

VŠB- Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření průtokových charakteristik pneumatických prvků  
pomocí programu Matlab-Simulink

Measurement of Pneumatic Components Flow  
Characteristics

Student:

Bc. Aleš Paluzga

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.

Ostrava 2010

VŠB- Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## Zadání diplomové

Student: **Bc. Aleš Paluzga**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3909TO01 Konstrukční a procesní inženýrství  
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Tema: **Měření průtokových charakteristik pneumatických prvků pomocí programu Matlab-Simulink**

**Measurement of Pneumatic Components Flow Characteristics by  
Software Matlab – Simulink**

Zásady pro vypracování:

V prostředí Matlab – Simulink sestavte program pro snímání tlaku a průtoku při proudění vzduchu pneumatickými řídicími prvky. Vypracujte následující body:

1. Sestavte přehled průtokových součinitelů řídicích prvků a vedení stlačeného vzduchu.
2. Popište způsob měření průtokových součinitelů.
3. Sestavte program pro měření a vyhodnocení výsledků v programech Matlab a Simulink.
4. Proveďte měření průtokových součinitelů vybraných prvků.
5. Vyhodnoťte naměřená data.

### Seznam doporučené odborné literatury:

BEATER, P. *Pneumatic drives: system design, modelling and control.*

Berlin: Springer, 2007. 323 pp. ISBN 978-3-540-69470-0

NEVRLY, J. *Modelování pneumatických systémů. 1. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, 2003. 180 s. ISBN 80-7204-300-5

KOLEKTIV AUTORŮ. *SMC Training – Stlačený vzduch a jeho využití.*

Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.

KARBAN, P. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. 1. vyd.*

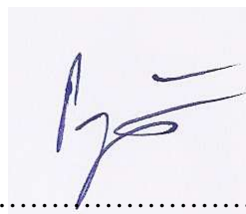
Brno: Computer Press, 2006. 220 s. ISBN 80-251-1301-9

## Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

21. 5. 2010

V Ostravě.....



.....  
podpis studenta


**Prohlašuji, že:**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, же Высoкá школа ба́нская – Техни́кая универзита Острава (дále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst.3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce.
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21. 5. 2010 Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:



ALEŠ PALUZGA  
OKRUŽNÍ 1736/20  
HLAVÍN  
748 01

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PALUZGA, A. Měření průtokových charakteristik pneumatických prvků pomocí programu Matlab-Simulink: diplomová práce. Ostrava: VŠB- Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení 2010, 53 s. Vedoucí: Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá měřením průtokových charakteristik pneumatických prvků pomocí programu Matlab-Simulink. Úvod sestavuje přehled průtokových součinitelů řídicích prvků a vedení stlačeného vzduchu. Další bod představuje způsob měření podle normy ISO 6358, která popisuje měřicí trať, jež je sestavena z jednotlivých snímačů a řídicích prvků. Další část se zaměřuje na jednotlivé snímače a řídicí prvky, pomocí nichž je měřicí trať sestavena. Úloha se měří v laboratoři. K ní je sestaveno schéma v prostředí Matlab-Simulink. Po odzkoušení a vyladění měřicí trati probíhá měření jednotlivých pneumatických prvků. Cílem je změřit požadované veličiny pro výpočet zvukové vodivosti  $C$  a kritického tlakového poměru  $b$ . Data jsou následně zaznamenána a převedena do programu Matlab. Pro grafické a výpočetní znázornění se vytvoří M-file, který umožňuje rychlé znázornění grafů  $p/Q$  a námi požadované vypočtené hodnoty  $C$  a  $b$ . Naměřená data se následně porovnávají s tabulkovými hodnotami výrobce.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

PALUZGA, A. Measurement of flow characteristics of pneumatic components using Matlab-Simulink: Master thesis. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment 2010, 53 p. Supervisor: Ing. Lukas Dvořák, Ph.D.

This master thesis deals with flow characteristics of pneumatic components using Matlab-Simulink. Introduction contains a review of flow control elements and factors of compressed air. Then there's described a way to measure according to ISO 6358 and described the test track, which is made up of various sensors and control elements. The following describes the various sensors and control elements, by means of the test track was made. The task was measured in a laboratory, where was compiled for this purpose also a scheme in Matlab-Simulink. After testing and fine-tuning the test track is carried out a measurement of pneumatic elements, which is tasked to measure the required variables for calculating the acoustic conductivity  $C$  and the pressure ratio  $b$ . Afterwards the data are recorded and transferred to Matlab programme. For a graphical and computing presentation there is created an M-file, which allows a fast presentation of graphs  $P / Q$  and the required calculated values  $C$  and  $b$ . Eventually, the measured data are compared with the tabular data from the manufacturer.

## Obsah

strana

<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Přehled průtokových součinitelů .....</b>	<b>10</b>
1.1 Tlak .....	10
1.2 Průtok .....	10
1.3 Průtokové diagramy .....	13
1.4 Výpočty průtoku sériovým a paralelním řazením prvků .....	15
<b>2 Způsoby měření průtokových charakteristik .....</b>	<b>19</b>
2.1 Zvuková vodivost $C$ .....	19
2.2 Kritický poměr tlaků $b$ .....	19
2.3 Hmotnostní průtok $m$ .....	20
2.4 Srovnání ISO a JIS .....	22
<b>3 Měřicí trať ISO 6358 .....</b>	<b>23</b>
3.1 Měřicí karta MF 624 .....	26
3.2 Snímače a řídicí prvky .....	27
3.2.1 Elektropneumatický převodník REXROTH 561 012 062 0 .....	27
3.2.2 Snímač průtoku SD 6000 .....	28
3.2.3 Snímač teploty SENSIT STU-Ni .....	29
3.2.4 Snímače tlaku ISE40 .....	29
3.2.5 Proporcionální průtokový ventil MPYE-5-1/8-LF-010-B .....	30
3.3 Schéma zapojení snímačů a řídicích prvků .....	31
3.4 Program pro měření a vyhodnocení výsledků v programu Matlab-Simulink .....	33
3.5 Měření maximálního průtoku prvkem .....	38
3.6 Měření průtoku $Q_n$ .....	40
<b>4 Měření vybraných prvků .....</b>	<b>42</b>
4.1 SYA 3220 SMC .....	42
4.2 R3M5 Festo .....	45
4.3 EVM13 SMC .....	46
4.4 SV-5-M5 B .....	48
<b>5. Vyhodnocení naměřených dat .....</b>	<b>50</b>
<b>6. Závěr .....</b>	<b>51</b>
<b>7. Seznam použité literatury .....</b>	<b>52</b>
<b>8. Seznam příloh.....</b>	<b>.....</b>

Seznam použitého označení:

<i><b>Značka</b></i>	<i><b>Název veličiny</b></i>	<i><b>Rozměr</b></i>
$A_M$	plocha pístu	[mm]
$C$	zvuková vodivost	[dm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> ]
$C_v$	součinitel průtoku	[gal(USwet).min <sup>-1</sup> .]
$D$	průměr	[mm]
$I$	proud	[mA]
$K_v$	součinitel průtoku	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]
$L$	délka	[mm]
$Q$	objemový průtok	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> , dm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]
$Q_N$	normální průtok	[dm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]
$Q_{Nn}$	normální jmenovitý průtok	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]
$Q_{Nne}$	ekvivalentní průtok	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]
$Q_{MAX}$	maximální průtok	[dm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]
$R$	odpor	[Ω]
$R_0$	plynová konstanta	[J.(Kg.K) <sup>-1</sup> ]
$S$	poměrný průřez	[mm <sup>2</sup> ]
$T_n$	teplota okolí	[K]
$T_1$	teplota naměřená	[K]
$U$	napětí	[V]
$V$	objem	[m <sup>3</sup> ]
$V_n$	normální objem	[m <sup>3</sup> ]
$b$	kritický tlakový poměr	[1]
$d$	vnitřní průměr	[mm]
$f$	frekvence	[Hz]
$k_v$	součinitel průtoku	[dm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ]
$\dot{m}$	hmotnostní průtok	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$n$	otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$p$	přetlak	[Pa]
$p_a$	absolutní tlak	[Pa]
$p_{at}$	atmosférický tlak	[Pa]
$p_N$	jmenovitý tlak	[Pa]
$p_1$	vstupní tlak	[Pa]
$p_2$	výstupní tlak	[Pa]
$\Delta p$	tlakový spád	[Pa]
$p_2/p_1$	tlakový poměr	[1]
$t$	čas	[s]
$\rho$	hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]



## Úvod

Má diplomová práce na téma *Měření průtokových charakteristik pneumatických prvků pomocí programu Matlab-Simulink* je rozdělena do čtyř hlavních částí.

První část poukazuje na přehled průtokových součinitelů řídicích prvků a vedení stlačeného vzduchu, kde je důraz kladen zejména na přepočty průtokových součinitelů a rozdělení proudění vzduchu na nadkritické a podkritické.

Část následující popisuje způsob měření průtokových součinitelů dle normy ISO 6358 s využitím rovnic pro výpočet zvukové vodivosti  $C$ , kritického poměru tlaku  $b$  a hmotnostního průtoku  $\dot{m}$ .

Část třetí popisuje sestavení program pro měření a následné vyhodnocení výsledků za pomoci programu Matlab a Simulink. Dále se zabývá přehledem použitých komponentů pro samotné měření.

Poslední část nás seznamuje s možnostmi měření pneumatických prvků, jenž byly cíleně vybrány v laboratoři katedry. Výsledky naměřených a vypočtených hodnot byly pak zakresleny pomocí programu Matlab a Excel do grafů a následně porovnány s hodnotami výrobce.

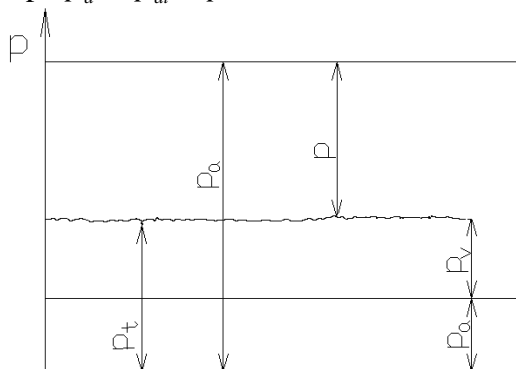
V rámci této práce byly využity jak mé teoretické znalosti, tak praktické zkušenosti ze studia hydraulických a pneumatických zařízení a strojů.

## 1. Přehled průtokových součinitelů

Nejdůležitějšími parametry v pneumatických obvodech je tlak a průtok. Protéká-li obvodem stlačený vzduch musí být na výstupu z obvodu nižší tlak než na jeho vstupu. Tomuto rozdílu říkáme diferenční tlak nebo tlakový spád.

### 1.1 Tlak

Tlak je v pneumatických mechanismech označován a dosazován v jednotkách  $\text{N.m}^2 = \text{Pa}$  nebo také v  $1\text{bar} = 100\text{kPa} = 0,1\text{MPa}$ . Při výpočtech je třeba rozlišit tlak absolutní a přetlak znázorněn na obr. 1.1.0. Platí tedy, že absolutní tlak se vypočte, když sečteme atmosférický tlak  $p_{at}$  a přetlak  $p$ .  $p_a = p_{at} + p$  [1].



obr. 1.1.0 Definice tlakových hladin vzduchu

### 1.2 Průtok

Průtok bývá označován  $Q$ , a udává se v  $[\text{m}^3.\text{s}^{-1}, \text{dm}^3.\text{min}^{-1}, \text{m}^3.\text{h}^{-1}]$ . Jelikož je průtok v pneumatickém mechanismu spotřebován a odvádí se zpět do ovzduší přes výfuk, lze jej nazývat spotřeba vzduchu. Protože je však tato spotřeba závislá na tlaku a teplotě podle uvedené rovnice stavu (1.2) používá se tzv. normální stav, který je označován  $Q_n$  [1].

$$V_N = V \cdot \frac{p_a}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T_1} \quad [\text{dm}^3] \quad (1.1)$$

$$Q_N = Q \cdot \frac{p_a}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T_1} \quad [\text{dm}^3.\text{s}^{-1}] \quad (1.2)$$

...po dosazení  $T_1 = T_N$  a  $p_N = p_a = 100 \text{ [kPa]}$ ...se rovnice zjednoduší

Základním kritériem pro volbu vhodného měřicího zařízení bude požadavek měřit průtok v tlakovém potrubí, čili na vstupu do měřeného prvku, nebo v odpadním potrubí tj. na výstupu z měřeného prvku. Pneumatické prvky mají pro skladbu pneumatického systému v katalozích uváděn přepočtený jmenovitý průtok  $Q_{Nn}$  nebo průtokový součinitel  $K_v$  [1]. Protože pro vysokou stlačitelnost vzduchu, značnou tepelnou a tlakovou závislostí jeho měrné hmotnosti a složitosti průtokových kanálů v pneumatickém prvku není možné exaktní výpočet průtoku  $Q_{Nn}$  či průtokového součinitele  $K_v$ , byly proto vypracovány a ověřeny metody stanovení těchto parametrů. Pro vyjádření odporu proudění se používají součinitelé průtoku  $k_v$ ,  $K_v$ ,  $C_v$   $Q_n$  nebo poměrný průřezem  $S$  [2].

**$k_v$**  – metrický údaj v „normálních litrech za minutu“ [ $dm^3 \cdot min^{-1}$ ]. Měření je provedeno s vodou o teplotě 5 až 30 °C. Faktor  $k_v$  je roven 1,0, kdy při tlakové ztrátě 1,0 bar proteče ventilem za minutu jeden litr vody teplé 4°C. Faktory  $K_v$ ,  $k_v$ ,  $C_v$  a  $f$  jsou porovnávací faktory.

**$K_v$** - je stejný jako  $k_v$ , pouze průtok je vyjádřen [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]

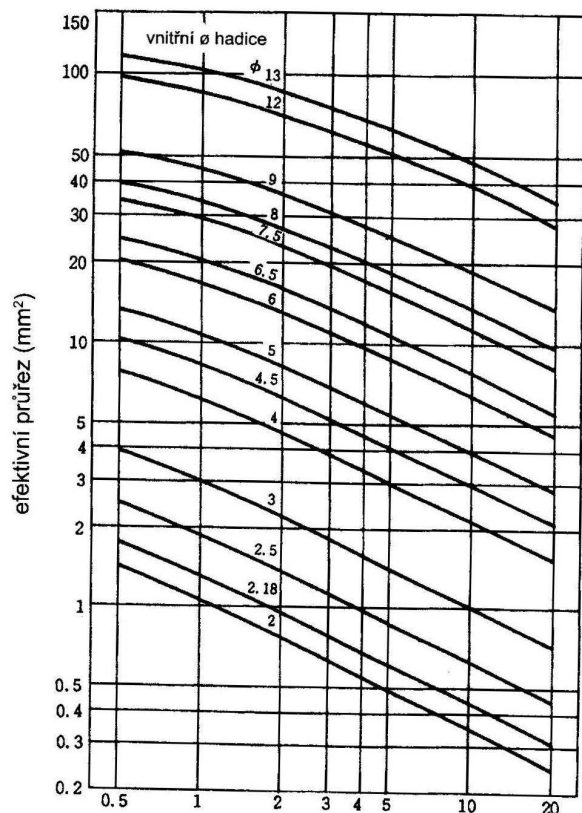
**$C_v$** - je obdobný faktor jako výše uvedené faktory, pouze se vyjadřuje v anglosaských jednotkách. Údaje jsou vztaženy na průtok 1 US (3,79l) vody za minutu při tlakové ztrátě 1psi (0,007MPa) a při teplotě 60°F (15,6°C).

**$f$** - měření za stejných podmínek jako  $C_v$  ale s průtokem 1,0 imperiálního (britského) galonu (4,54 vody za minutu při tlakové ztrátě 1psi a při teplotě 60°F)

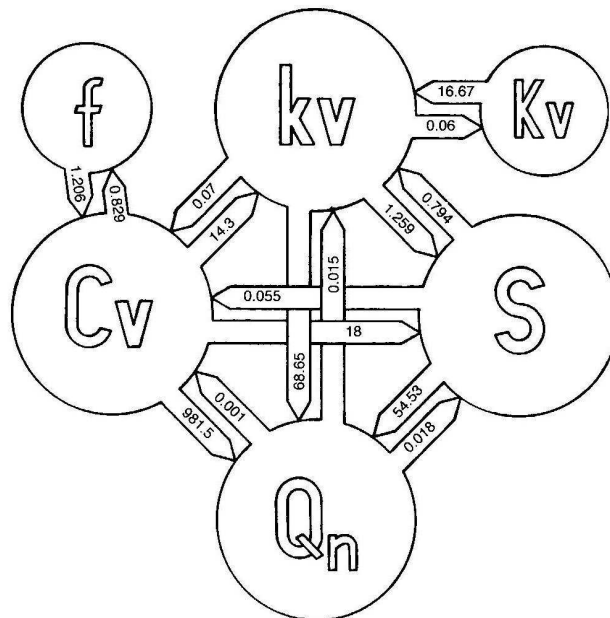
**$S$** - poměrný průřez je získaný měřením průtoku vzduchu, představuje ventil nebo celou soustavu prvků, jako plochu otvoru měřicí clony, kterou proteče udaný objem vzduchu.

Poměrný průřez plastové hadice vedením zjistíme z následujícího grafu Obr. 1.2.0 a to jaký je efektivní průřez hadic v závislosti na její délce.

Pro přepočet poměrného průřezu  $S$  [ $mm^2$ ] na průtok  $Q$  [ $dm^3 \cdot min^{-1}$ ] se používá vztah:  $Q = 54,4 \cdot S$



Obr. 1.2.0 efektivní průřez hadic

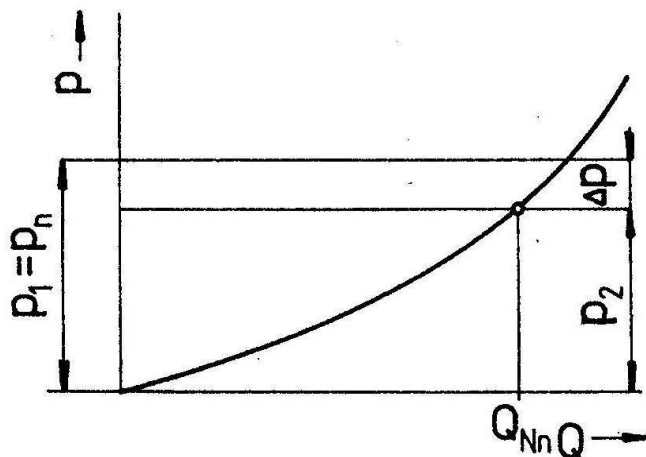


Obr. 1.2.1 násobné koeficienty

Na obr. 1.2.0 je uveden graf pro určení efektivního průřezu hadic v závislosti na jejich délce a vnitřním průměru. Na obr. 1.2.1 jsou uvedeny přepočební vztahy mezi různými faktory a koeficienty, které můžeme používat k vyjádření objemu vzduchu, který proteče daným prvkem.[2]

### 1.3 Průtokové diagramy

Jmenovitý průtok  $Q_{Nn}$  se stanovuje při jmenovitém tlaku  $p_n=p_1=0,6$  [MPa] a tlakovém spádu mezi vstupem a výstupem z měřeného prvku  $\Delta p=0,1$  [MPa] [1], na obr. 1.3.1 je znázorněn graf pro definici jmenovitého normovacího průtoku.



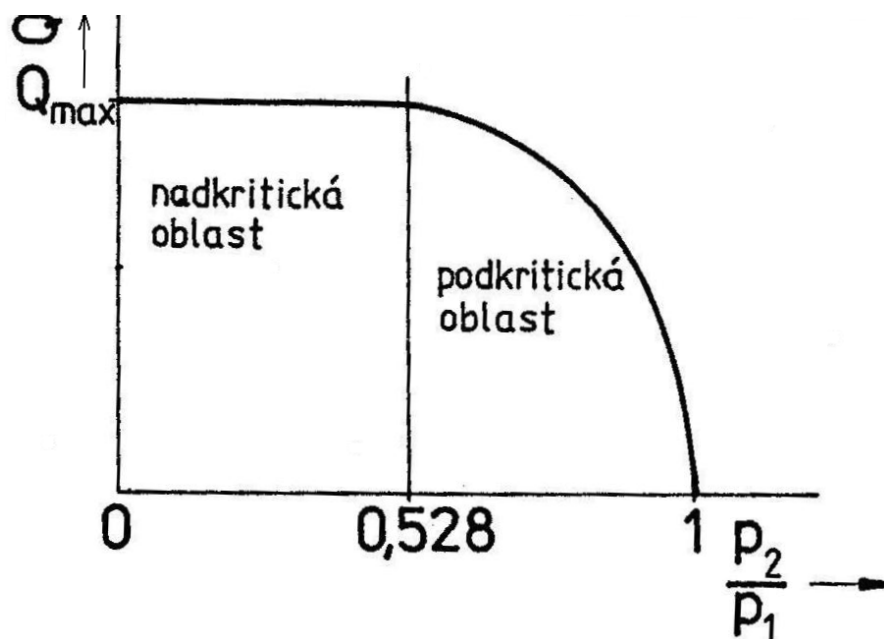
Obr. 1.3.1 jmenovitý normovací průtok

Mezi normovaným průtokem  $Q_N$  a jmenovitým průtokem  $Q_{Nn}$  platí vztah (1.3)

$$Q_N = 4,08 \cdot Q_{Nn} \cdot \sqrt{p_2 \cdot \Delta p} \quad (1.3)$$

$\Delta p$  a  $p_2$  jsou dosazované absolutní tlaky v MPa

Při proudění vzduchu mohou nastat dva případy proudění a to jak nadkritické tak podkritické proudění. Toto proudění je rozděleno určitým poměrem tlaku  $p$ , tzv. kritický tlakový poměr  $b$ . Po překročení kritického poměru tlaků  $b$  je průtok konstantní. Na obr.1.3.2 je vidět rozhraní mezi podkritickým a nadkritickým prouděním, kde je kritický poměr tlaků  $b$  vyjádřen hodnotou 0,528, což je hodnota pro bezztrátový průtok dýzou. U skutečných prvků je tato hodnota nižší, jak je popsáno dále. Pro přepočet  $Q_N$  a  $K_v$  v jednotlivých oblastech lze použít vztahy (1.4) až (1.11).



Obr. 1.3.2 závislost objemového průtoku na tlakovém spádu

**Podkritické-**  $\frac{p_2}{p_1} > 0,53$

$$Q_{Nn} = 2,52 \cdot 10^2 \cdot K_v \cdot \frac{p_1}{2} \sqrt{1 - \left( \frac{\frac{p_2}{p_1} - 0,5}{1 - 0,5} \right)^2} \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (1.4)$$

$$K_v = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{Q_{Nn}}{\sqrt{\Delta p \cdot p_2}}, \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (1.5)$$

$$Q_{Nn} = 4,2 \cdot 10^3 \cdot K_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot p_2}, \quad [dm^3 \cdot h^{-1}] \quad (1.6)$$

$$K_v = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{Q_{Nn}}{\sqrt{\Delta p \cdot p_2}}, \quad [dm^3 \cdot min^{-1}] \quad (1.7)$$

**Nadkritické-**  $\frac{p_2}{p_1} < 0,53$

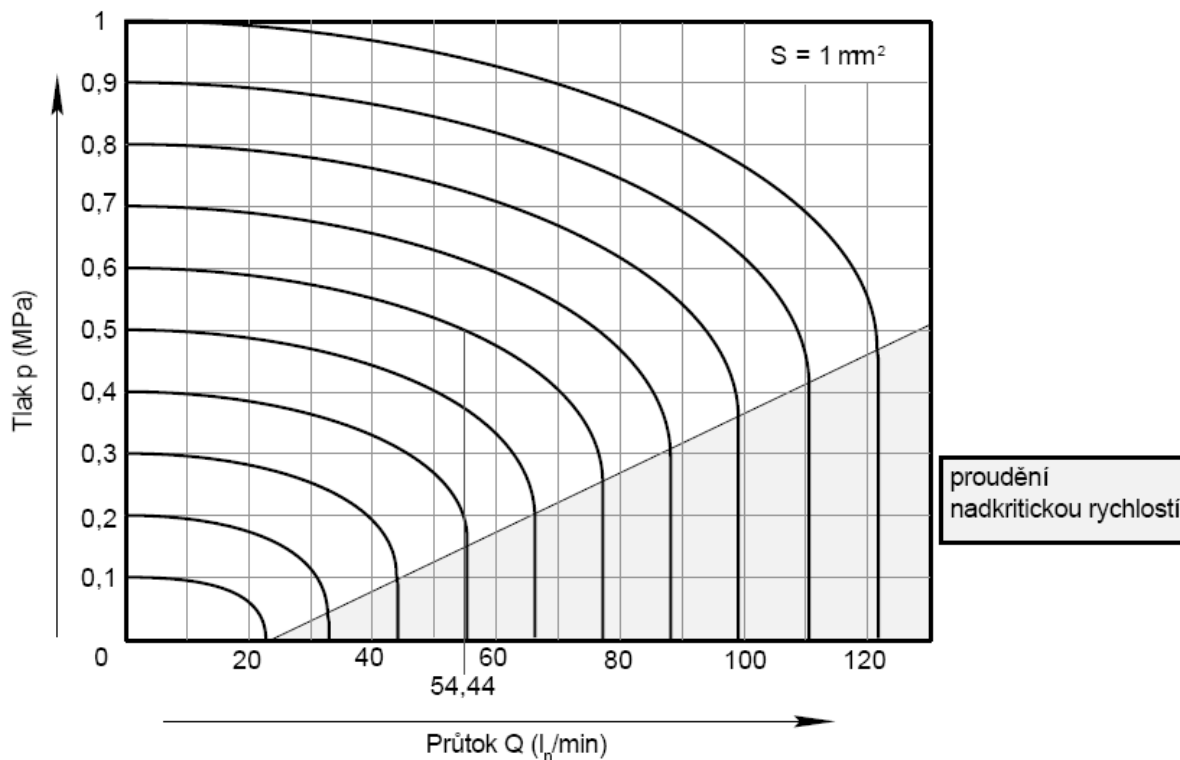
$$Q_{Nn} = 13,2 \cdot K_v \cdot p_1 \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (1.8)$$

$$K_v = 7,6 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{Q_{Nn}}{p_1} \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (1.9)$$

$$Q_{Nn} = 2,2 \cdot 10^2 \cdot K_v \cdot p_1 \quad [dm^3 \cdot min^{-1}] \quad (1.10)$$

$$K_v = 4,55 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{Q_{Nn}}{p_1} \quad [dm^3 / min] \quad (1.11)$$

Pro zjištění přibližného objemu vzduchu, který proteče jednotlivými prvky (ventily, šroubení atd.) za minutu používáme univerzální diagram  $p/Q$  obr. 1.3.3, jenž vyjadřuje závislost mezi vstupním a výstupním diferenčním neboli tlakovým spádem a objemem vzduchu [2]. Z tohoto grafu lze určit nadkritickou a podkritickou oblast.



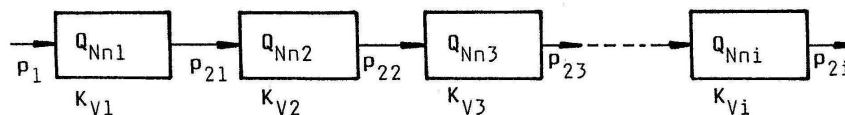
Obr. 1.3.3 Diagram  $p/Q$

#### 1.4 Výpočty průtoku sériovým a paralelním řazením prvků

Při návrhu je třeba zjistit průtokovou propustnost pneumatického obvodu. Cílem tohoto výpočtu je zjistit velikost průtoku mezi zdrojem tlaku a pracovním prvkem. Pro ověření se využívají podklady a hodnoty jednotlivých prvků, které uvádí výrobce ve firemním podkladech. Často bývají hodnoty v katalozích výrobců uváděny jako  $Q_n$ , ty jsou dále přepočteny na normovaný průtok  $Q_{Nn}$ , nebo průtokový součinitel  $K_v$  či  $C_v$ . Ověření dostatečně velkého průtoku se provádí jak pro sériové tak paralelní zapojení [1], [2].

### Sériové řazení prvků

Sériový obvod se skládá z řady prvků k nimž je potřeba zahrnout také vedení (hadice), přípojná a rozvodná šroubení [4]. Obvod je znázorněn na obr. 1.4.1



Obr. 1.4.1 sériové řazení prvků

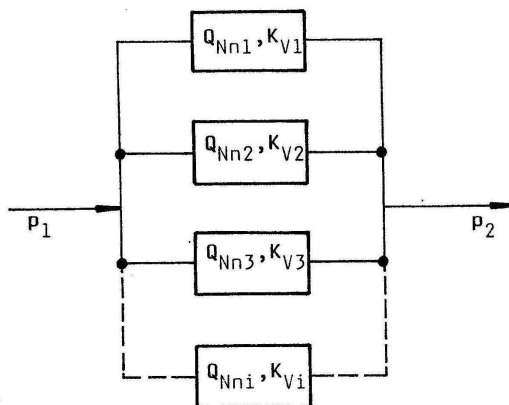
Pro výpočet průtoku takovou soustavou je třeba použít metodu ekvivalentního (náhradního) průtoku nebo ekvivalentního součinitele průtoku.

$$Q_{Nne} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{a=1}^i \frac{1}{Q_{Nn}^2}}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{Q_{Nn1}^2} + \frac{1}{Q_{Nn2}^2} + \frac{1}{Q_{Nn3}^2} + \dots + \frac{1}{Q_{Nni}^2}}} \quad (1.12)$$

$$K_{Ve} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{a=1}^i \frac{1}{K_{Vi}^2}}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{K_{V1}^2} + \frac{1}{K_{V2}^2} + \frac{1}{K_{V3}^2} + \dots + \frac{1}{K_{Vi}^2}}} \quad (1.13)$$

### Paralelní řazení prvků

Paralelní obvod se skládá ze stejných prvků jako sériové řazení. Tento obvod je znázorněn na Obr. 1.4.2 paralelní řazení. V následující rovnici je výpočet jednotlivých ekvivalentních součinitelů průtoku.



Obr. 1.4.2 paralelní řazení



$$Q_{Nne} = \sum_{i=1}^s Q_{Nni} = Q_{Nn1} + Q_{Nn2} + \dots + Q_{Nnn} \quad (1.14)$$

$$K_{ve} = \sum_{i=1}^s K_{vi} = K_{v1} + K_{v2} + \dots + K_{vn} \quad (1.15)$$

### **Zhodnocení průtoků**

Na závěr je třeba ekvivalentní hodnoty průtoků porovnat s hodnotami potřebnými. Zjistit zda jsou splněny podmínky, co se týče velikosti prvků, světlosti hadic a volby přípojného šroubení. Porovnání se provede podle rovnice (1.16), kontrola může být provedena také přes součinitel  $K_v$ , kde musí být splněna podmínka (1.17). Pokud jsou splněny uvedené podmínky, je zaručeno dosažení potřebné rychlosti.

$$Q_{Nne} \geq Q_{NM} \geq A_M \cdot v_M \cdot \frac{p_M}{p_0} = V_g \cdot n_M \cdot \frac{p_M}{p_0} \quad (1.16)$$

$$K_{veM} \geq K_{ve} \quad (1.17)$$

Další metodou, kterou můžeme zjistit dosažení požadované rychlosti pneumatického pohonu je metoda poměrným průřezem  $S$  [mm<sup>2</sup>], u níž je třeba zajistit odpovídající množství vzduchu, které může do pohonu za daného tlaku protéci odpovídajícím průřezem. Tato metoda se dá rozdělit do dvou. *Empirická*, jež je odvozená z dosavadních zkušeností, ověřena praktickou zkouškou (měření zapojených prvků). Dále metoda *Matematická*, kdy se přibližný celkový poměrný průřez vypočte z poměrných průřezů použitých prvků, kde výpočtová rovnice pro poměrný průřez je (1.18) [2].

$$\sum S = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_n^2}}} \quad (1.18)$$

Tuto metodu používá především Japonská firma SMC, která používá pro přepočet S na Q rovnici (1.19)

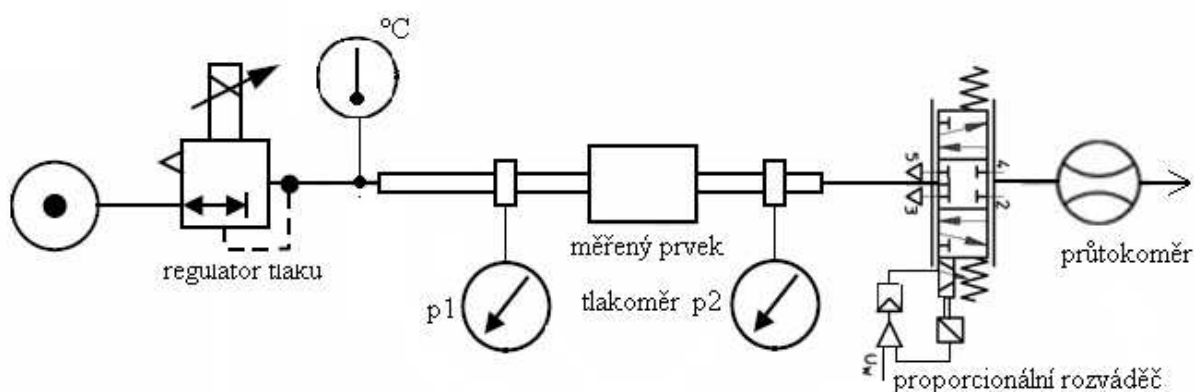
$$Q = 54,4 \cdot S \quad [\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.19)$$

Někteří výrobci uvádějí ve svých podkladech pro volbu řídicích prvků průtokové diagramy, vykresleny v závislosti vstupního tlaku  $p_1$ , výstupního tlaku  $p_2$  a průtoku  $Q_{Nn}$  obr. 1.3.3. [2].

Při nulovém průtoku je vstupní a výstupní tlak stejný. Pouze při zvětšování průtoku přes řídicí prvky klesá výstupní tlak  $p_2$  podle křivky, odpovídající hodnotě vstupního tlaku  $p_1$ . Omezující přímka, vycházející z hodnot tlaku  $p_2 = p_1$  vyznačuje hodnoty maximálního průtoku při kritické rychlosti, která odpovídá poměru  $p_2/p_1 = 0,53$ , od této mezní hodnoty se průtok nezvyšuje.

## 2. Způsoby měření průtokových charakteristik

Měření se provádí pomocí měřicí trati pro stanovení normalizovaného průtoku  $Q_n$  podle normy ISO 6358, která je znázorněna na obr. 2.0.1 [2]. Model měřicí trati byl navržen Sanvillem v roce 1969, CETOP se stal v roce 1973 základem pro normu ISO a to v roce 1989. Kromě průtoku  $Q_n$  se dají měřit další dva parametry, které popisují hmotnostní průtok, kritický tlakový poměr  $b$  a zvukové vodivosti  $C$  [3]. Mým úkolem bylo pomocí tohoto zapojení měřicí tratě zjistit hodnoty potřebné pro výpočet součinitelů zvukové vodivosti  $C$  a tlakového poměru  $b$ . Vzhledem k náročnosti měření byla navíc požadována automatizace celého procesu.



Obr. 2.0.1 Měřicí trať ISO 6358

**2.1 Zvuková vodivost  $C$**  : součástí je poměr mezi hmotnostním průtokem  $\dot{m}$  a absolutním tlakem na vstupu. Pro zjištění zvukové vodivosti  $C$  se používá rovnice (2.1), kde je podíl hmotnostního průtoku dělen vstupním tlakem  $p_1$  a hustotou  $\rho$ .

$$C = \frac{\dot{m}}{p_1 \cdot \rho} \quad [\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}]$$

(2.1)

**2.2 Kritický poměr tlaků  $b$**  : je poměr mezi výstupním absolutním tlakem  $p_2$  a vstupním absolutním tlakem  $p_1$ , při kterých dosahuje rychlost proudění vzduchu rychlosti zvuku. Kritický tlakový poměr je typický tím, že jeho hodnota je nižší než hodnota 0,5, pro ventily obvykle nad 0,2, ale může být také definován jako 0 jako je to např.

u proporcionálních řídicích regulačních ventilů. Výpočet tlakového poměru  $b$ , se provádí je-li splněna konstantní vstupní teplota po celou dobu během zkoušky. Pro výpočet hodnoty  $b$  pro každou hodnotu  $Q_m$  vypočítám z následující zjednodušené rovnice (2.2).

$$b = 1 - \frac{\frac{p_1 - p_2}{p_1}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Q_m}{Q_{\max}}\right)^2}} \quad (2.2)$$

**2.3 Hmotnostní průtok  $\dot{m}$ :** U tohoto hmotnostního průtoku záleží na kritickém poměru tlaků  $b$ , kdy je pro jednotlivé oblasti nadkritických a podkritických proudění použita rovnice (2.3) a (2.4).

**Nadkritický:**       $pro: \frac{p_2}{p_1} \leq b$        $\dot{m} = p_1 \cdot C \cdot \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$       (2.3)

**Podkritický:**       $pro: \frac{p_2}{p_1} > b$        $\dot{m} = p_1 \cdot C \cdot \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{p_2}{p_1} - b}{1 - b}\right)^2}$       (2.4)

kde je:  $\dot{m}$  - hmotnostní průtok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $p_1$  - vstupní tlak [Pa],  $p_2$  - výstupní tlak [Pa],  
 $\rho_0$  - hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $T_0$  - teplota [K],  $T_1$  - vstupní teplota [K],  $b$  - kritický tlakový poměr

Rovnice (2.3) lze přirovnat k teorii mechaniky tekutin, rovnice ideálního průtoku tryskou s chybou pouze 0,33%.

V normě ISO 6358 jsou referenční podmínky definovány jako:

- Teplota  $T_0 = 293.15$  [K],
- tlak  $p_0 = 100$  [kPa]
- plynová konstanta  $R_0 = 288$  [ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]
- hustota  $\rho = 1.185$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Většina firem působících na našem trhu však udává většinou průtok objemový  $Q_n$  v [ $\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ], často však bývá označován v [ $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ]. Tento průtok označuje množství vzduchu, které proteče prvkem, přepočtené na normální podmínky (viz výše) a při relativní vlhkosti 65%. Pokud je teplota měřeného media vyšší nebo nižší, je potřeba vypočtený

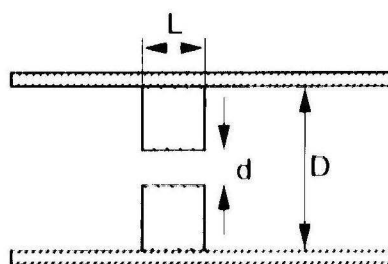
průtok násobit koeficientem, který je zaznamenán v tab. 2.3.1 [2].

Tab. 2.3.1 koeficient teplotních přepočtu

teplota média (°C)	-20	-10	0	10	30	40	50	60
koeficient	1,08	1,06	1,04	1,02	0,98	0,97	0,95	0,94

ISO model je možno použít pro několik typů pneumatických prvků a obecně je zjištěno, že je dostačující pro velmi malé otvory a trysky s průměrem 25  $\mu\text{m}$  [3]. Při výpočtech  $C$  a  $b$  záleží však také na konstrukční části, ta je určena měřením nebo údaji od výrobce. Rovnice (3.2) slouží pro výpočet zvukové vodivosti jednoduchým odporem zobrazeným na obr. 2.3.1 [3]. Rovnice pro výpočet kritických tlakových poměrů je vyjádřena v rovnici (3.3) [3]. U většiny prvků nelze takto jednoduše hodnoty  $C$  a  $b$  vypočítat a je třeba je zjistit přepočtem z naměřených hodnot, jak již bylo popsáno.

$D$ - průměr potrubí (mm),  $d$ - průměr škrcení (mm),  $L$  je délka škrcení (mm).

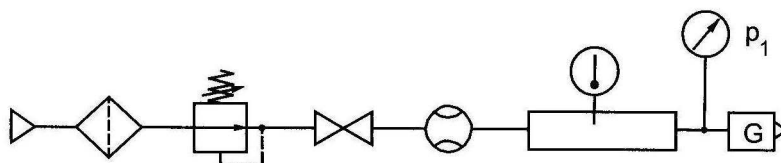


$$C = 0,128 \cdot d^2 \quad (3.2)$$

$$b = 0,41 + 0272 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (3.3)$$

Obr. 2.3.1 odvození malých otvorů

Dále také záleží na zapojení měřeného schématu. Pokud je zapojeno podle ISO normy, lze to provést dvěma způsoby. Zprv máme-li dva měřicí porty ( $p_1$  a  $p_2$ ), což znázorňuje Obr. 2.0.1. Zadruhé, pomocí jednoho vstupního portu  $p_1$  a druhého portu s výstupem přímo do atmosféry obr. 2.3.2. Moje měření průtokových součinitelů se bude zabývat měřicí tratí, která je na obr. 2.0.1. Pro měření s dvěma porty musíme nastavit na regulátoru tlaku nižší tlak a může probíhat měření.



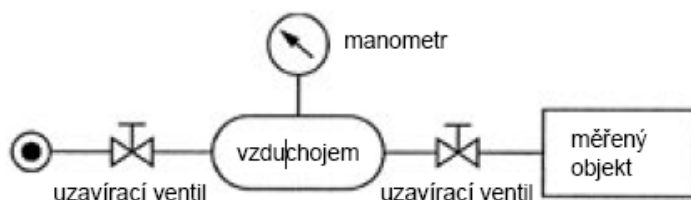
Obr.2.3.2 druhý způsob zapojení ISO normy

## 2.4 Srovnání ISO a JIS

ISO 6358 nastavujeme na ventilu vstupní tlak  $p_1 = 6\text{ bar}$  a výstupní tlak  $p_2 = 5\text{ bar}$ , takže je zapotřebí snížit energii na vstupu aby nedošlo k překročení rozdílů tlaku 1 bar. JIS (Japonský průmyslový standard)- u této normy se používá jiná metoda pro zjištění průtoku a to metoda měření rozdílu objemu vzduchu v daném vzduchojemu. Nás zajímá především jeho nastavení. Jeho prvním bodem nastavení bude ten, kdy ventil na výstupu ze vzduchojemu je uzavřen, tlak je 5 bar a ventil na přívodu do vzduchojemu je otevřen. Po uzavření ventilu na vstupu vzduchojemu odečítáme hodnoty z manometru a zapisujeme hodnoty tlaku ve vzduchojemu. Poté otevřeme ventil na výstupu vzduchojemu, a následně po 5 až 10 sekundách ventil uzavřeme, opět odečteme hodnoty z manometru a pokud nám tlak poklesne pod hodnotu 0,15 MPa, je zapotřebí použít větší vzduchojem [2]. Na obrázku 2.4.1 je znázorněna druhá varianta pro určení průtoku měřením, při změně tlaků daného objemu.

Poměrná plocha průřezu u JIS se vypočte s rovnice (3.4) [3]

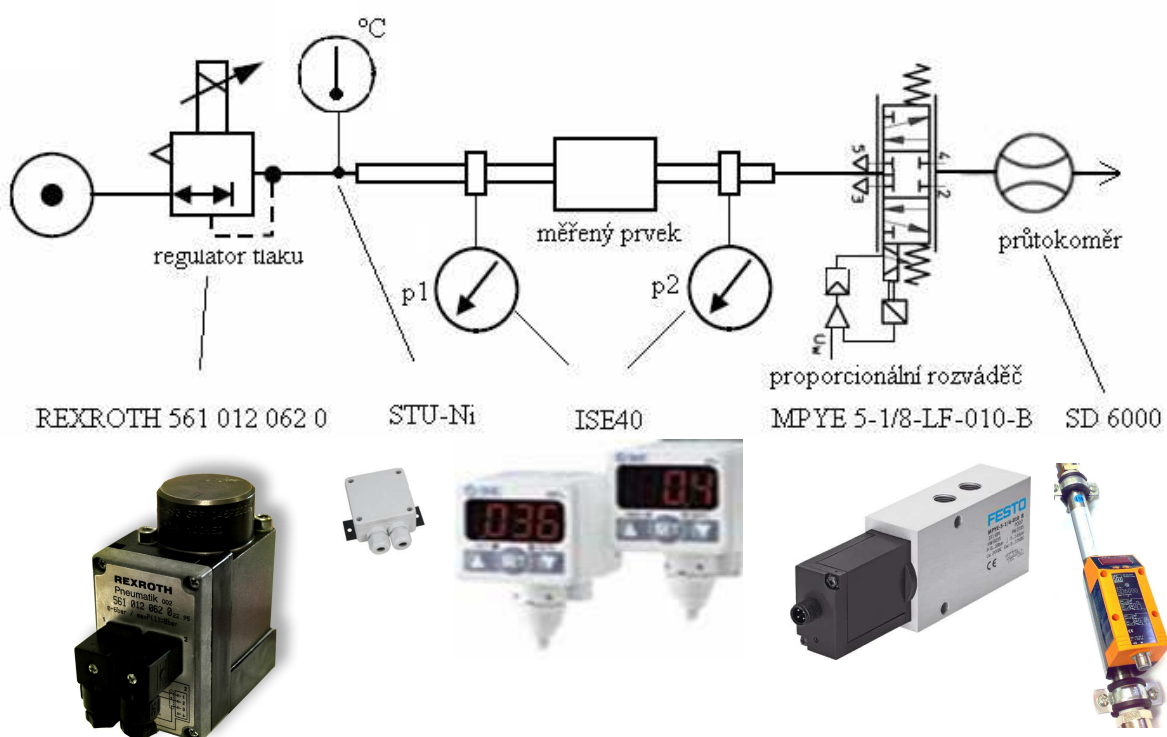
$$S = 12.1 \cdot \frac{V}{t} \cdot \log_{10} \left( \frac{p_0 + 0,1}{p + 0,1} \right) \sqrt{\frac{293}{T}} \quad (3.4)$$



Obr. 2.4.1 schéma obvodu pro zjištění součinitele průtoku měřením změny tlaků daného objemu

### 3. Měřicí trať ISO 6358

Toto měření provedu na měřicí trati evropské normy ISO 6358. U této normy budu potřebovat vhodné snímače tlaku, teploty, průtoku a také regulátor tlaku, na kterém bude zapotřebí nastavit vstupní hodnotu, kterou požaduje evropská norma ISO 6358. Na Obr. 3.0.1 je zobrazena měřicí trať s použitými snímači a jejich typovým označením. Měření provedu v laboratoři katedry na dané měřicí trati kterou sestavím s pneumatickými prvky, kde jejich specifikace je uvedena níže v kapitole 3.2



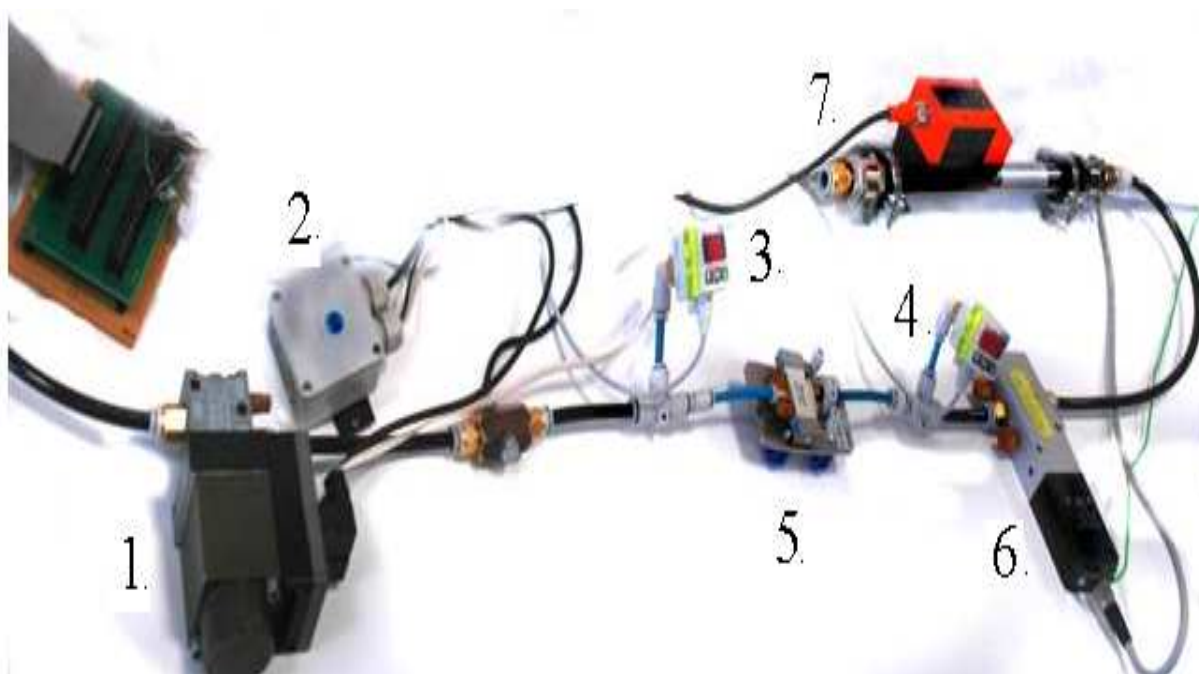
Obr. 3.0.1 Měřicí trať

#### Sestavení měřicí trati

Měřicí trať je sestavena z pneumatických snímačů a řídicích prvků, které byly dostupné v laboratoři katedry. Stlačený vzduch o tlaku maximálním 6 bar dodává kompresor do vzdušníku o objemu 300 litrů. Tlak vzduchu je pomocí multiplikátoru EVBA 1110-F02 od firmy SMC zvyšován na 0,8 MPa. Pro akumulaci tlakového spádu vzduchu o tomto tlaku je použit vzdušník o objemu 40 litrů. Tyto dva komponenty jako je multiplikátor a vzdušník o objemu 40 litrů se používá z důvodu dosažení požadovaného

vstupního tlaku minimálně 0,4 MPa, který nařizuje norma ISO 6358. Tato norma nařizuje nejen vstupní tlak, ale také uspořádání pneumatických prvků.

Po přívodu vzduchu ze vzdušníku je na začátek trati obr. 3.0.2 zapojen regulátor tlaku (č.1), který má za úkol nastavit vstupní tlak na požadovanou hodnotu. Následujícím snímačem je teploměr (č.2), který má snímat teplotu při průběhu měření. Pro měření tlaku jsou použity snímače (č.3 a 4), které mají za úkol snímat tlak před měřeným prvkem a za měřeným prvkem. Za snímačem tlaku p2 byl zapojen proporcionální rozváděč (č.6), jejímž úkolem bylo regulovat průtok měřeným prvkem na požadované hodnoty a to 80%, 60%, 40%, 20% průtoku. Z průtokoměru (č.7), který byl zařazen na konec měřicí trati je výstup vyveden do atmosféry. Zapojení jednotlivých snímačů a řídicích prvků do svorkovnice je popsáno v kapitole 3.3.



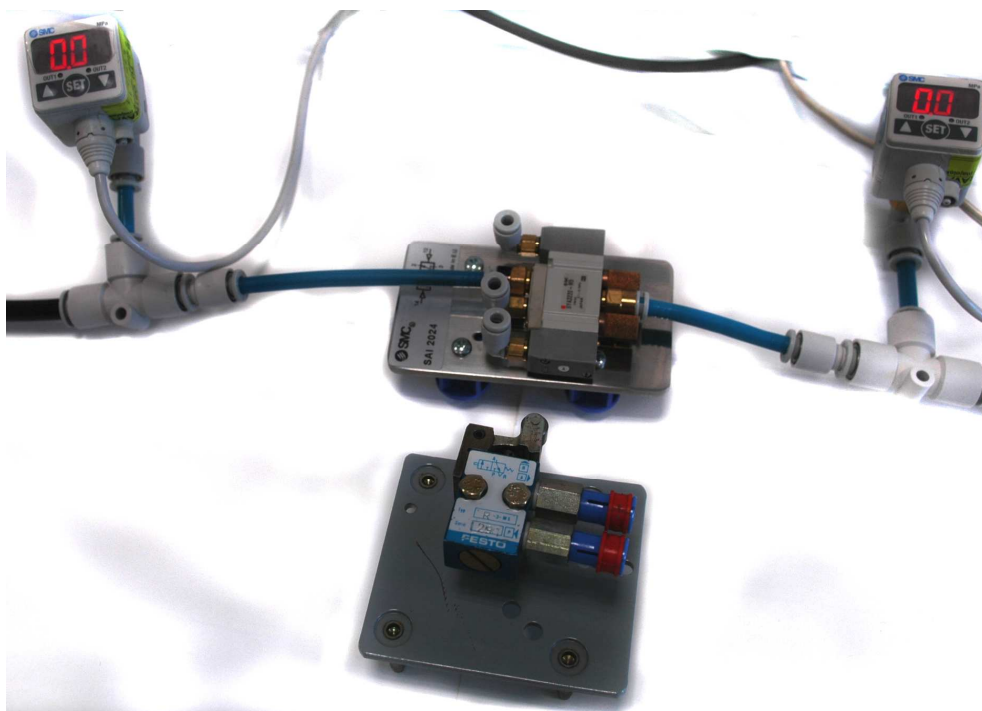
*Obr. 3.0.2 reálná měřicí trať*

Pro dosažení efektivního výsledku je třeba dodržovat postup měření nařízený dle normy ISO 6358.



**Postup měření:**

- udržet konstantní vstupní tlak  $p_1$ , ne menší než 0,4 MPa
- upravit tlakový regulátor k udržení konstantní hodnoty tlaku  $p_1$
- zmenšit tlak na odtoku  $p_2$  použitím průtokového ventilu, pokud není poklesem dosaženo dalšího růstu hmotnostního průtoku  $\dot{m}$ , označujeme tento jev jako „škrcení průtoku“
- naměřit teplotu  $T$  (č.2) , tlak průtoku  $p_1$ , hmotnostní průtok  $\dot{m}$  a tlak odtoku  $p_2$
- částečně uzavřít průtokový ventil k redukci hmotnostního průtoku  $\dot{m}$  (přibližně 80%, 60%, 40%, 20%  $Q_{n_{\max}}$ ).
- Z naměřených hodnot se vypočte  $C$  a  $b$ , podle výše uvedených rovnic (2.1) a (2.2)



*Obr. 3.0.3 detail měřených prvků*

### 3.1 Měřicí karta MF 624

Měření provedu pomocí této měřicí karty od firmy Humusoft obr. 3.1.1. Jedná se o AD převodník pro snímání dat, ale i pro řízení jednoduchých aplikací. Tato karta spolupracuje s programem Matlab-Simulink. Technické parametry jsou zaznamenány v následujících tabulkách tab.3.1.1-tab.3.1.4.



Obr. 3.1.1 měřicí karta MF 624

#### Aplikace:

- ☐ Měření stejnosměrných napětí
- ☐ Vícekanálový sběr dat
- ☐ Připojení převodníků a snímačů
- ☐ Simulace v reálném čase
- ☐ Měření vibrací a přechodových jevů
- ☐ Programovatelný napěťový výstup
- ☐ Řízení a monitorování procesů

#### **Analogové vstupy**

Tab. 3.1.1 analogové vstupy

<b>Kanály:</b>	8
<b>A/D převodník:</b>	14-bitový, doba převodu 10 microsec.
<b>Vstupní rozsahy:</b>	+10 V
<b>Spouštění:</b>	programově
<b>Ochrana vstupů:</b>	max. +18 V trvale

#### **Analogové výstupy**

Tab. 3.1.2 analogové výstupy

<b>Kanály:</b>	8 kanály, 14-bitů
<b>Výstupní rozsah:</b>	+10 V
<b>Výstupní proud:</b>	+10 mA max.

**Digitální vstupy/výstupy***Tab. 3.1.3 digitální vstup/výstup*

<b>Vstupní linky:</b>	8, s úrovněmi TTL
<b>Výstupní linky:</b>	8, s úrovněmi TTL

**Všeobecné údaje***Tab. 3.1.4 všeobecné údaje*

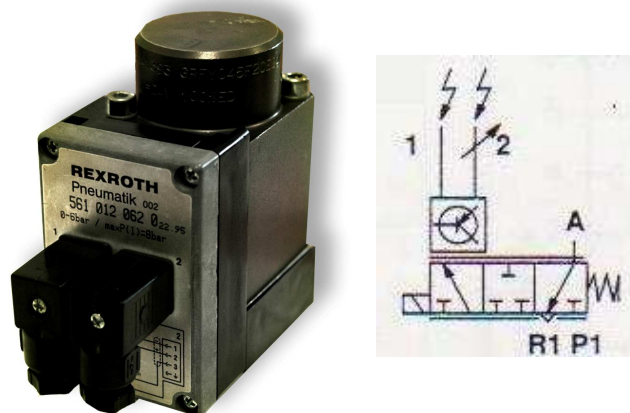
<b>Odběr proudu:</b>	500 mA @ +5 V, 150 mA @ +12 V, 150 mA @ -12 V
<b>Pracovní teplota:</b>	0 až 70 °C
<b>Konektor:</b>	DB-37
<b>Sběrnice</b>	PCI

**3.2 Snímače a řídicí prvky**

Ze snímačů, které jsou k dispozici na katedře jsem zvolil ty, které vyhovují požadavkům pro měřicí trať ISO6358 a měřicí kartu MF 624 . Jedná se o snímače tlaku, průtoku a teploty, regulátoru tlaku. Na konci měřicí trati použijeme místo škrticího ventilu proporcionální rozváděč od firmy FESTO, který bude regulovat průtok na 80%, 60%, 40% a 20%.

**3.2.1 Elektropneumatický převodník (napěťový) REXROTH 561 012 062 0**

Tento regulátor tlaku (1.) je staršího provedení, ale na katedře jsem jej vybral z důvodu, že jeho vstupní signál je napěťový v rozsahu 0-10V, pracuje v tlakovém rozsahu 0,01-0,6 MPa, tento převodník má stupeň krytí IP 64 odpovídající normě DIN VDE 0470. Technické parametry jsou zaznamenány v tab. 3.2.1 a regulátor je zobrazen na obr. 3.2.1.

*Obr.3.2.1 regulátor tlaku Rexroth*

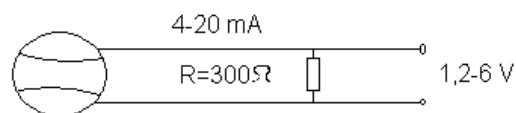
Tab. 3.2.1 technické parametry

Typ:	Tlakový rozsah	Připojovací závit	Vstupní signál	Výstupní signál	Napětí
561012 062 0	0,01-0,6 Mpa	G 1/8	0-10 V	0-20mA	24 V DC +-10%

### 3.2.2 Snímač průtoku SD 6000

Tento snímač (7.) slouží k sledování průtoku a spotřeby vzduchu. Na display přístroje je objemový průtok zobrazován v normálních l/min (přepočteno na  $p=101325$  Pa a  $t=15^{\circ}\text{C}$ ). Jeho pracovní rozsah se pohybuje od 4 až 20 mA, tento proudový výstup se musel změnit na napěťový pomocí odporu  $R=300\Omega$ . Napětí na odporu pomohlo převést proudový vstup na napěťový 1,2 až 6 V. Důležité parametry snímače jsou uvedeny v Tab.3.2.2.

$$\begin{aligned}
 U' &= R \cdot I & U' &= R \cdot I \\
 U &= 300 \cdot 0,004 & U &= 300 \cdot 0,02 \\
 \underline{U} &= \underline{1,2V} & \underline{U} &= \underline{6V}
 \end{aligned}$$



K měření dané úlohy použijeme typ SDR12DGXFPKG/US, který je zobrazen na obr. 3.2.2

Tab. 3.2.2 technické parametry snímače

Typ:	Měřicí rozsah	Zjišťovací oblast	Výstupní signál	Napětí
SD 6000	0,25 (0,3)...75 Nm <sup>3</sup> /h	0...90 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	Analogový výstup 4-20mA	12-24 V DC



Obr.3.2.2 průtokoměr SD 6000

### 3.2.3 Snímač teploty SENSIT STU-Ni

Převodníky typu STU (2.) jsou určeny k převodu signálu odporových snímačů teploty na bázi Ni na unifikovaný signál 0 až 10 V. Převodníky jsou tvořeny plastovou krabičkou z LEXANU, ve které je umístěna elektronika a svorkovnice pro připojení odporového čidla teploty a napájecího napětí. Krabička je vybavena konzolí pro montáž na stěnu nebo svorkou pro montáž na DIN lištu. Krytí svorkovnice vyhovuje stupni IP 65 podle ČSN EN 60 529. Měřicí rozsah je -30 až 60°C. Převodníky je možné použít pro všechny řídicí systémy, které jsou kompatibilní s napěťovým výstupem 0 až 10 V. Teplotní rozsah odolnosti převodníku je -30 až 80 °C a nesmí být ani krátkodobě překročen. Převodníky jsou určeny pro provoz v chemicky neagresivním prostředí. Technické parametry jsou zaznamenány v tab. 3.2.3 a vyobrazeny na obr. 3.2.3.



Obr. 3.2.3 STU-Ni

Tab. 3.2.3 technické parametry

Typ:	Měřicí rozsah	Teplota okolí	Výstupní signál	Vstupní signál
STU-Ni	-30 až 60°C	(-30 až 80°C)	0-10 V	Ni 1000

### 3.2.4 Snímače tlaku ISE40

Tyto snímače (3. a 4.) mají širokou nabídku příslušenství, jejich velký čitelný displej nám umožňuje snadno odečítat naměřené hodnoty. Mezi výhody tohoto snímače patří jeho jednoduchost a dialogové vedení nastavení. Opakovatelná přesnost sepnutí +/- 0,2% z celkového rozsahu. Nastavitelná reakční doba 2,5,24,192 a 768 ms.

Tento snímač pracuje v rozsahu -0,1 až 1 MPa a výstupní signál je 1 až 5 V. Důležité parametry snímače jsou uvedeny v Tab.3.2.4, zobrazen je na obr. 3.2.4

K měření dané úlohy použijeme typ ISE 40-01-62L od firmy SMC.



Obr. 3.2.4 snímače tlaku ISE 40

Tab.3.2.4 technické parametry snímače

Typ:	Tlakový rozsah	Připojovací závit	Výstupní signál	Napětí
ISE40-01-62L	-0,1 ~ 1,0 MPa	R1/8	1 ~ 5V analogový 2x PNP	12-24 V DC

### 3.2.5 Proporcionální průtokový ventil MPYE-5-1/8-LF-010-B :

Tento přímo ovládaný proporcionální ventil (6.) obsahuje polohovací šoupátko. Převádí analogový vstupní signál na odpovídající průřez na výstupu. V kombinaci s vnějším regulátorem koncových poloh a odměřovacím systémem lze vytvořit přesný pneumatický polohovací systém. Funkce škrcení pro změnu rychlosti válce u této funkce 5/3 je pro změnu směru pohybu. U tohoto proporcionálního rozváděče je střední poloha uzavřena tehdy pokud je vstupní signál 5V. Pro polohy zcela otevřené jsou vstupní hodnoty 0 nebo 10V. Technické parametry proporcionálního rozváděče jsou uvedeny v tab. 3.2.5 a zobrazen je na obr. 3.2.5



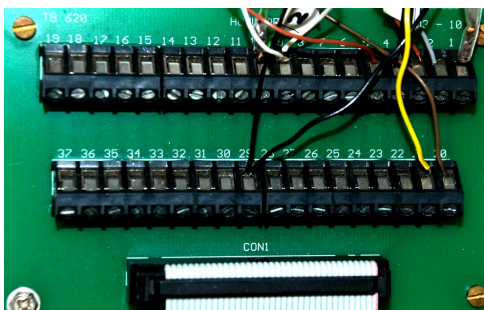
Obr. 3.2.5 Proporcionální ventil MPYE-5-1/8-LF-010-B

Tab. 3.2.5 technické parametry proporcionálního průtokového ventil

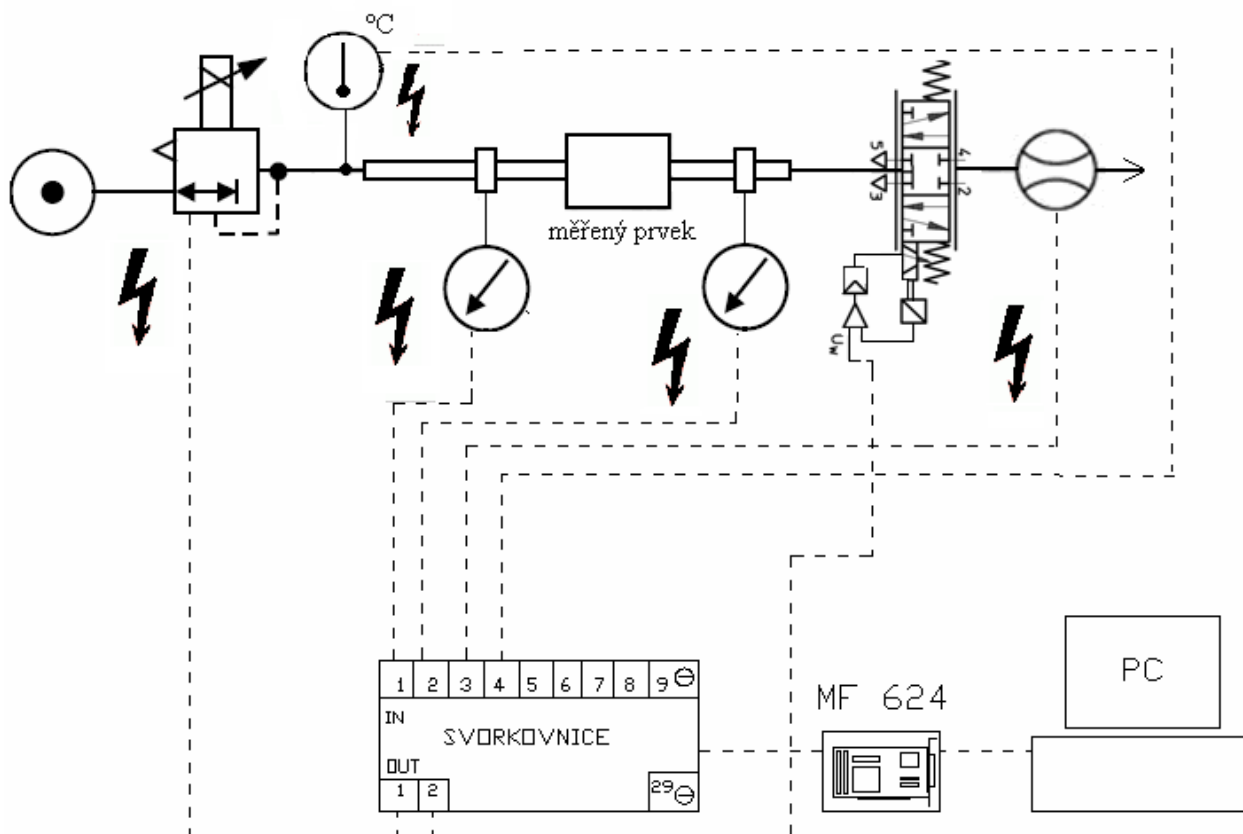
Typ:	Tlakový rozsah	Průtok	Připojovací závit	Výstupní signál	Napětí
MPYE-5-1/8-LF-010-B	0-10bar	100 až 350 l/min	G1/8	0 ~ 10V analogový	17-30 V DC

### 3.3 Schéma zapojení snímačů a řídicích prvků:

Jednotlivé snímače byly zapojeny do svorkovnice obr. 3.3.1, dále následuje schéma, které je znázorněno na obr. 3.3.2, kde je vidět zapojení jednotlivých snímačů na svorky. Důležité je také, že na svorce 9 a 29 jsou zapojeny záporné napěťové signály jednotlivých snímačů, které udává výrobce měřicí karty MF 624. Snímače měřených veličin jsou zapojeny na svorky 1-4 vstup-IN, na svorky 1-2 výstup-OUT. Tato svorkovnice je propojena s PC a měřicí kartou MF 624. Pomocí vytvořeného schéma v Simulinku probíhá měření a řízení jednotlivých prvků. Tyto měření jsou zaznamenávány v programu Matlab. O vyhodnocení naměřených hodnot je popsáno níže v kapitole 3.4.



obr. 3.3.1 svorkovnice



orb. 3.3.2 schéma zapojení snímačů

**Zapojení snímačů:**

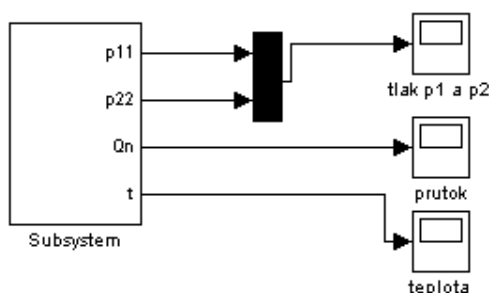
Snímače jsou zapojeny elektrickými vodiči do svorkovnice. Každá svorka odpovídá číslu, které je výše uvedeno u schématu obr. 3.3.2. Těmto svorkám odpovídají i bloky RT-In a RT-Out v Simulinku. Na schéma zapojení snímačů je tedy vidět, na které vstupní svorce IN je zapojen snímač tlaku ISE 40 (svorka č.1. a 2.), průtokoměr SD 6000 (svorka č.3), snímač teploty (svorka č. 4). Na svorkách Out jsou zapojeny řídicí prvky a to regulátor tlaku Rexroth (svorka č.1) a proporcionální rozváděč Festo (svorka č.2). Tyto dva řídicí prvky mají vzájemnou vazbu na tlak  $p_1$  a na průtok  $Q_n$ , jelikož norma ISO 6358 nařizuje udržovat tlak na konstantních hodnotách a průtok řídit na požadované hodnoty v % jak jsem již výše uvedl.



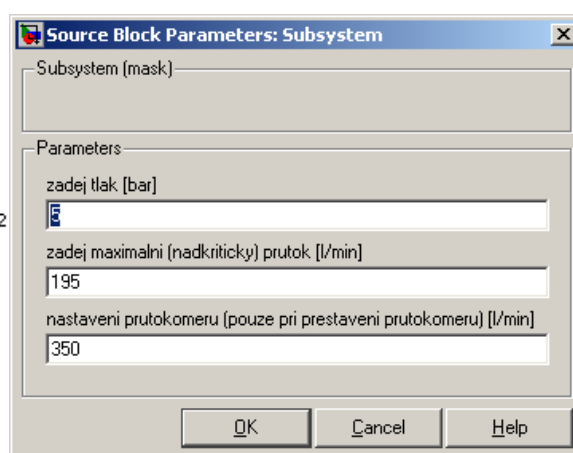
### 3.4 Program pro měření a vyhodnocení výsledků v programu Matlab-Simulink

Pro měření požadovaných veličin je vytvořen v prostředí Matlab-Simulink subsystém obr. 3.4.1. který umožňuje jednoduché nastavení daného měření. Po dvojkliku na subsystém se otevře příkazové okno obr. 3.4.2, kde jsou jednotlivé nabídky na zadání hodnot. První požadovanou hodnotou je vstupní tlak „zadej tlak [bar]“, druhá hodnota je „maximální (nadkritický) průtok“, další hodnota je nastavení maximálního průtoku na průtokoměru. Pro zadání maximálního průtoku je potřeba zjistit pomocí jiného měření jmenovitý maximální průtok daným prvkem. Podrobnější nastavení měření je popsáno v kapitole 3.5.

vzorkovací frekvence 0,025

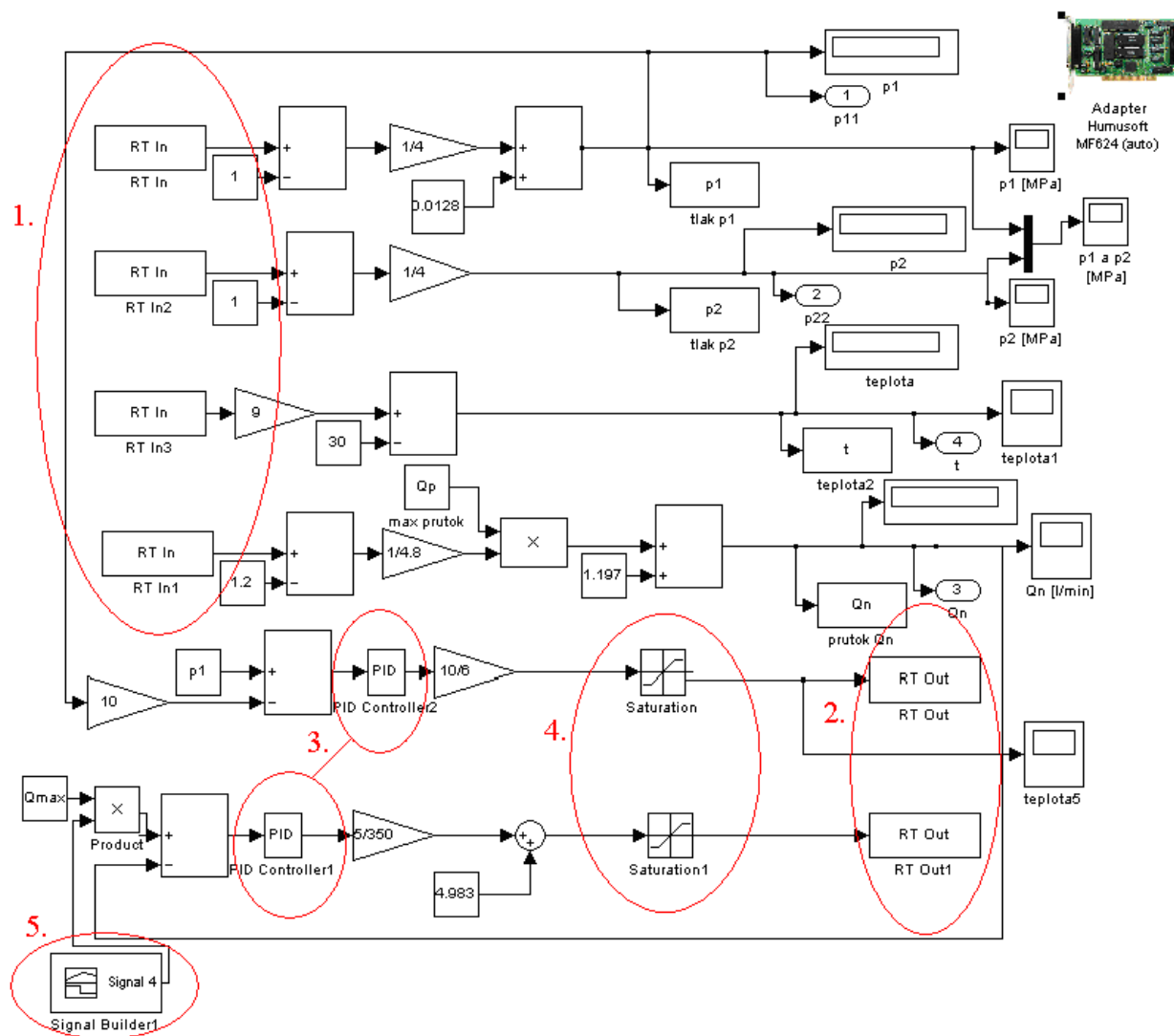


Obr. 3.4.1 subsystém C a b



Obr. 3.4.2 příkazové okno

V tomto subsystému je vytvořeno schéma obr. 3.4.3. Toto schéma obsahuje převod vstupních napěťových signálů na požadované hodnoty měřené veličiny. Dále odesílá naměřené hodnoty do programu Matlab, kde dochází k výpočtům jednotlivých požadovaných veličin  $C$  a  $b$  a následnému vykreslení grafu závislosti  $p/Q$ . Dále jsou popsány jednotlivé detaily nastavení v bodech 1-5. Toto schéma je zjednodušeno a zakresleno do subsystému obr. 3.4.2,



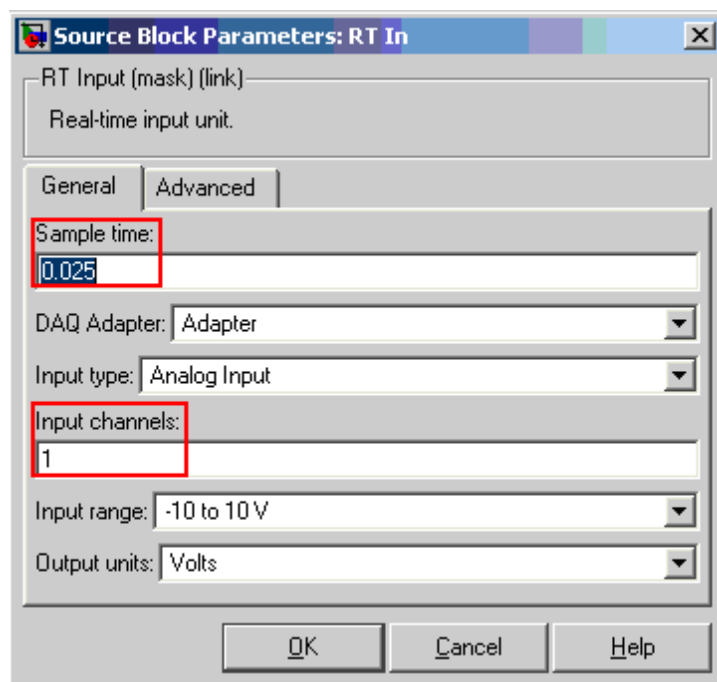
Obr. 3.4.3 schéma v Matlab-Simulink

**Popis schéma:****Detail č. 1.**

Popisuje připojení jednotlivých vstupních veličin snímačů, u těchto bloků RT- In obr. 3.4.4, které slouží pro získávání dat v aplikacích, kde musí být data zpracována okamžitě po jejich získání. U tohoto bloku jsem nastavil měřicí periodu (sample time) na hodnotu 0,025. Dalším parametrem je číslo svorky (adapter chanel), kde jsem podle čísla kanálů na svorkovnici nastavil číslo kanálu.

Číslo kanálů:

- 1-2 snímač tlaku
- 3 průtokoměr
- 4 snímač teploty

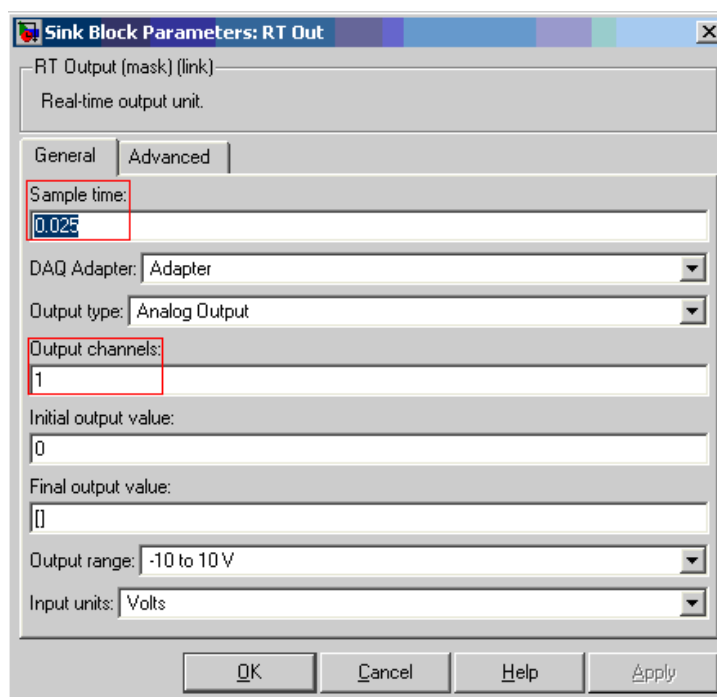


Obr.3.4.4 blok RT-In

## Detail č. 2

Tento blok RT-Out obr. 3.4.5, popisuje připojení výstupních veličin jednotlivých řídicích prvků. U tohoto bloku jsem nastavil měřicí periodu (sample time) na hodnotu 0,025. Dalším parametrem je Output Channels, kde jsem podle čísla kanálů na svorkovnici nastavil číslo kanálu.

Číslo kanálů: 1 regulátor tlaku  
2 proporcionální  
rozváděč



Obr. 3.4.5 RT-Out

**Detail č. 3**

Tento blok PID regulátor obr. 3.4.6 je umístěn v posledních dvou větvích schématu. U tlaku je blok zařazen do předposlední větve. Pro řízení tlaku jsou nastaveny rozličné hodnoty než pro řízení průtoku. Nastavené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 3.4.6. Na rozdíl od bloku, který je zařazen do poslední větve schématu, kde dochází k řízení průtoku. Nastavené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 3.4.7, u těchto bloků jsou nastaveny jednotlivé proporcionální, integrační a derivační složky. Nastavení probíhá testováním měřicí trati po takovou dobu až je dosaženo optimální regulace.

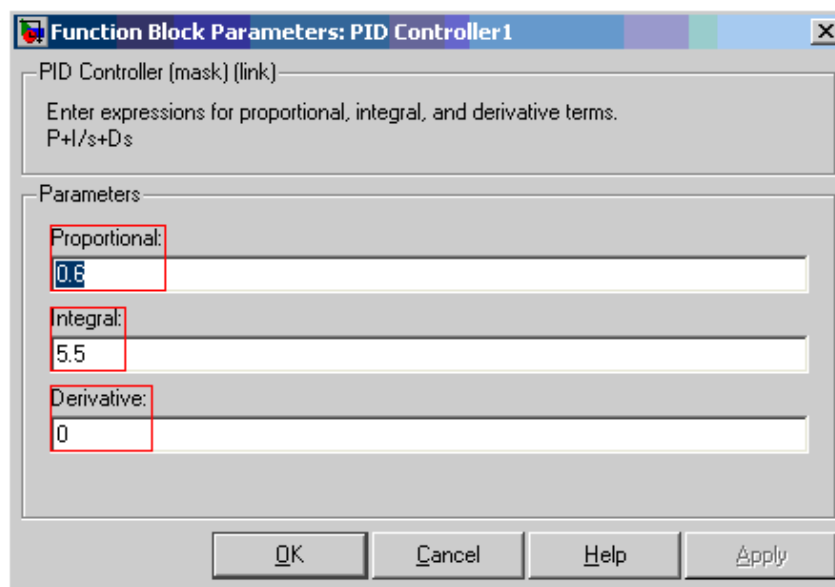
Nastavené hodnoty PID regulátoru průtoku   Nastavené hodnoty PID regulátoru tlaku

*Tab. 3.4.6 PID - průtok*

Proporcionální	0,6
Integrační	5,5
Derivační	0

*Tab. 3.4.7 PID - tlak*

proporcionální	0,5
integrační	5
derivační	0



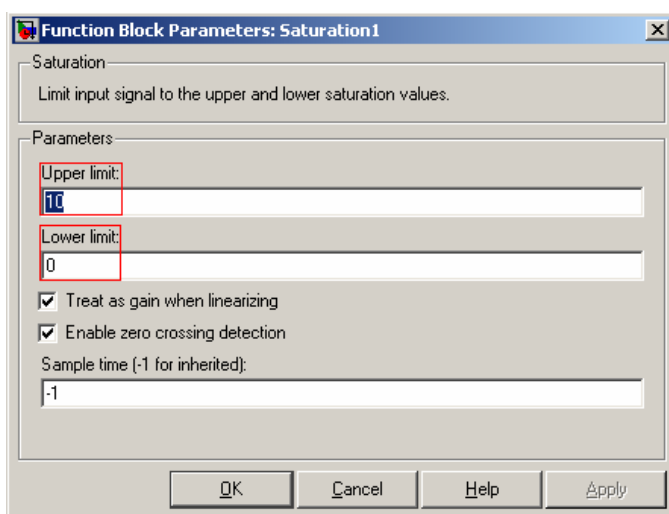
*Obr. 3.4.6 PID regulátor*

## **PID regulátor**

Jde o nejuniverzálnější regulátor. Nastavovací signál je tvořen váženým součtem proporcionální odezvy na regulační diferenci. Při vzniku regulační difference vytváří P-složka okamžitě trvalou složku nastavovacího signálu. I-složka vytváří účinnou složku nastavovacího signálu i při nepatrné regulační diferenci, kterou může předvídavým překmitem nastavovacího signálu urychlit vyrovnaní náhle vzniklé regulační difference. PID- regulátor zesiluje, integruje a derivuje regulační diferenci a je univerzálně použitelný [7].

### **Detail č. 4**

Blok Saturation obr. 3.4.7, je také zařazen do posledních dvou větví schématu. U toho bloku se nastavuje maximální a minimální propustnost napěťového signálu. V mém případě tato hodnota nastává v rozmezí 0-10.

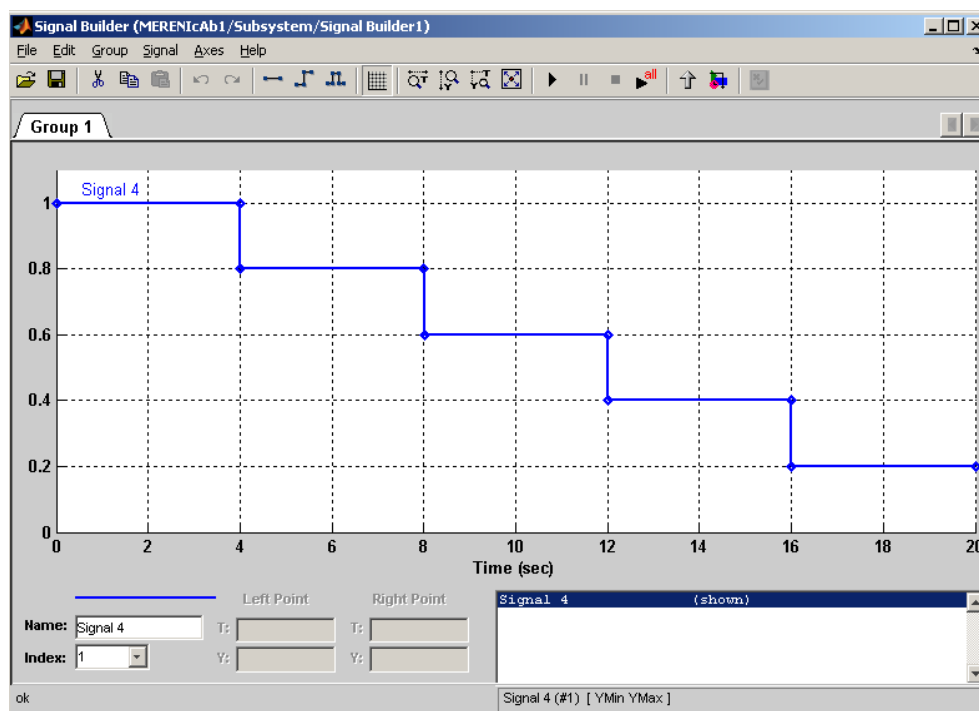


Obr. 3.4.7 blok Saturation

### **Detail č. 5**

*Signal Builder* obr.3.4.8, tento blok slouží k nastavení časového průběhu otevírání a zavírání rozváděče. Čas uzavírání ventilu byl nastaven na  $t = 20\text{s}$ . Tento čas byl nastaven z důvodu úspory stlačeného vzduchu. Jednotlivé úseky jsou nastaveny po 4 sekundách. Skokový signál byl nastaven podle normy ISO 6358, která udává podmínku, že měření průtokových charakteristik u pneumatických prvků musí být měřeno při 100%, 80%, 60%, 40%, 20% průtoku. Výstupní signál ze *signal builderu* je násoben

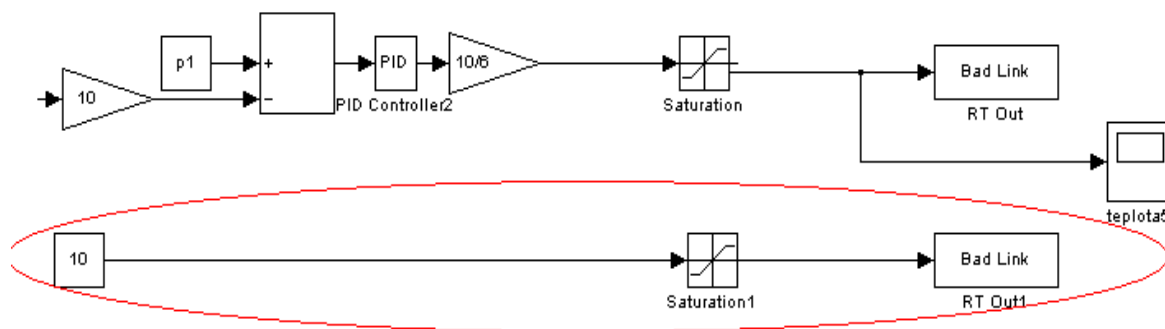
maximálním průtokem, čímž je dosaženo uvedených procentuálních hodnot průtoku. Takto vypočtený signál vstupuje do PID regulátoru, který nastavuje šoupátko proporcionálního rozváděče na požadované hodnoty průtoku.



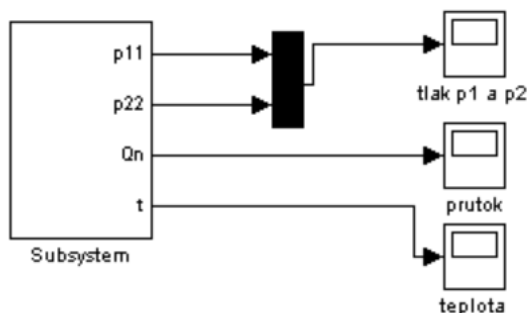
Obr.3.4.8 Signal Builder

### 3.5 Měření maximálního průtoku prvkem

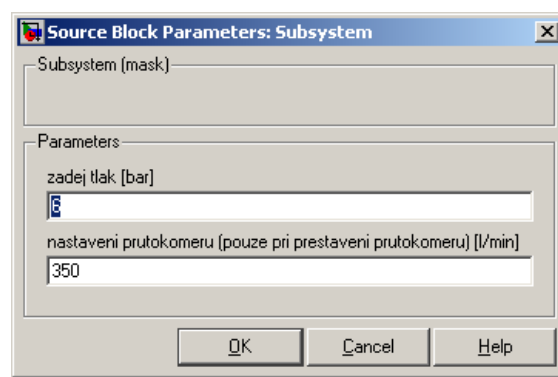
Toto měření musí podstoupit každý měřený prvek ještě předtím, než dojde k samotnému měření  $C$  a  $b$ , které bylo popsáno v kapitole 3.4, kde je třeba vyplnit hodnotu, jenž se zadává do příkazového okna obr. 3.4.3 „zadej maximální (nadkritický) průtok“. Pro toto měření bylo upraveno schéma obr. 3.4.1, kde došlo ke změně pouze v poslední větvi schématu, kde se nastavila hodnota 10, která u proporcionálního rozváděče udává polohu otevřenou na maximum. Naměřenou hodnotu jsem odečetl z grafu  $Q$  a následně ji zadal do příkazového okna. Detail upraveného schématu je zobrazen a zakroužkován červeně na obr. 3.5.1, dále je pak na obr. 3.5.2 zobrazen subsystém, který zjednodušil schéma a umožnil rychlé zadání požadovaných hodnot příkazovým řádkem, obr. 3.5.2, kde bylo zapotřebí zadat pouze tlak a maximální hodnotu, která je nastavena na průtokoměru.



Obr. 3.5.1 detail nastavení pro měření maximálního průtoku



Obr. 3.5.2 subsystém maxQ



Obr. 3.5.3 příkazový řádek maxQ

Po zjištění maximálního průtoku lze začít měřit zvukovou vodivost  $C$  a kritický tlakový poměr  $b$ , který je popsán v kapitole 3.4. Pro výpočet hodnot  $C$  a  $b$  z hodnot naměřených pomocí Simulinku je vytvořen v programu Matlab soubor M-file (příloha A), který nese název „vodivost.m“ tento program je naprogramovaný podle jednotlivých rovnic pro jednotlivé výpočty požadovaných hodnot a vykreslení grafů  $p/Q$ .

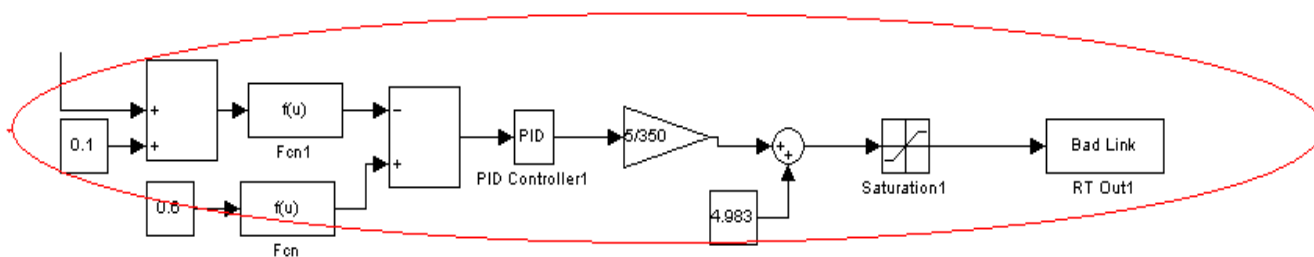
### 3.6 Měření průtoku Qn

Cílem tohoto úkolu je změřit průtok Qn. Na obr 3.4.3 došlo k úpravě signálu poslední větve schématu, následně je pak na obr. 3.6.1 vykreslen detail zapojení signálu. Pro měření průtoku Qn nařizuje norma ISO 6358 podmínku, kdy musí být dodržen výstupní tlak  $p_2$  na konstantní hodnotě nižší o 0,1 MPa než vstupní hodnota tlaku  $p_1=6$  MPa. V Simulinku proběhla úprava signálu, jímž došlo k vzájemné vazbě mezi signálem průtoku Qn a tlaku  $p_2$ . Požadovaný a měřený tlak  $p_2$  byly přepočteny na průtok dle rovnice

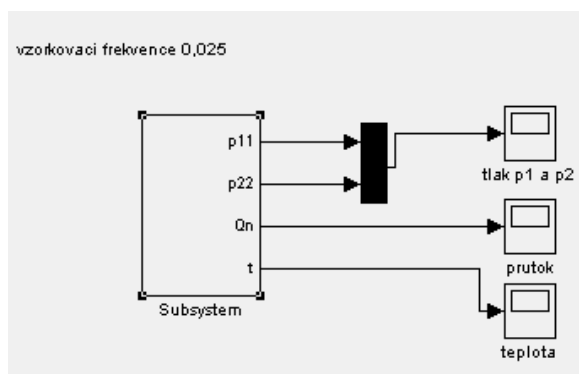
$Q = 342 - 404.78 \cdot u(1)$ . Hodnota rozdílu vypočtených průtoků vstupuje do PID regulátoru, který řídí polohu šoupátka proporcionálního rozváděče, čímž je regulován tlak  $p_2$ . Pro zjednodušení měření je sestaven subsystém, obr. 3.6.2 a příkazové okno, obr. 3.6.3, ve kterém se nastaví požadovaný vstupní tlak  $p_1$ . U této úpravy signálu jsou taktéž nastaveny hodnoty na PID regulátoru. Nastavení probíhá stejně jako v předchozím měření testovací trati do doby, než je dosaženo optimální regulace. Nastavené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 3.6.1.

Tab. 3.6.1 PID-regulátor průtoku Qn

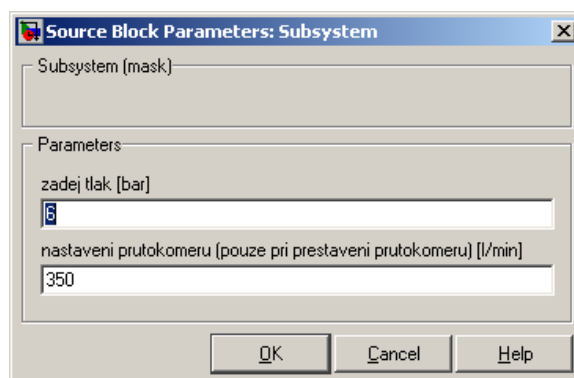
proporcionální	0,1
integrační	5
derivační	0



Obr. 3.6.1 detail zapojení schématu pro měření Qn



Obr. 3.6.2 subsystem měření Qn



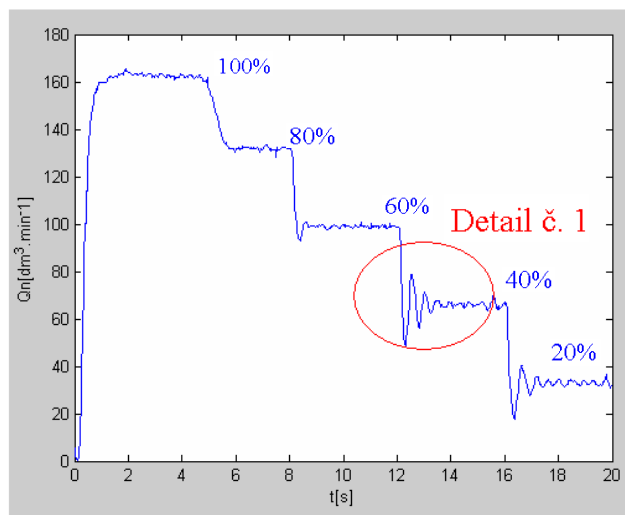
obr. 3.6.3 příkazové okno



## Příklad průběhu průtoku a tlaku

### Natavený průtok

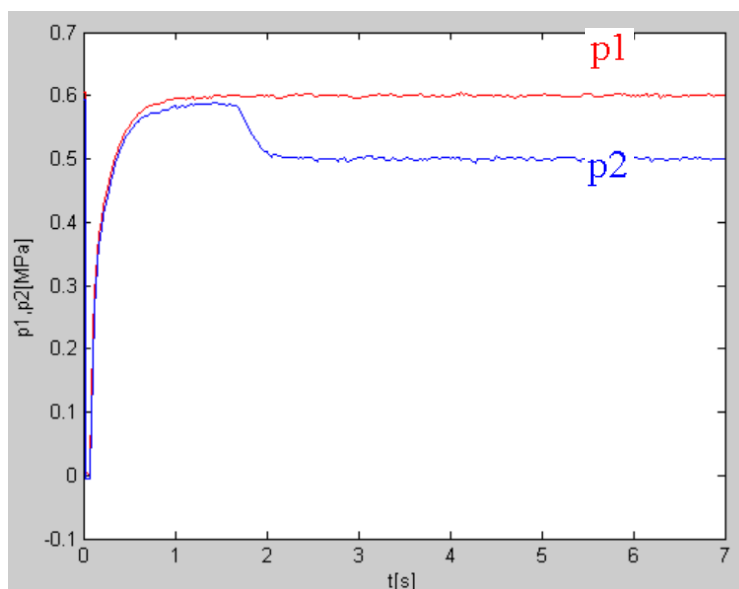
U průtoku je regulace horší, dochází k záškmitu v oblasti  $50\text{--}60\text{ dm}^3/\text{min}^{-1}$ . Tento záškit je způsoben vlastnostmi proporcionálního rozváděče, detail č. 1 jej znázorňuje na obr. 3.6.4.



Obr. 3.6.4 graf průběhu průtoku v závislosti na čase

### Nastavení tlaku

Regulace tlaku je znázorněna na obr. 3.6.5, kde je vidět rychlá regulační odezva. Kde vstupní tlak  $p_1$  je v grafu znázorněn červenou křivkou a odpovídá požadované hodnotě 0,6 Mpa a tlak  $p_2$  je vykreslen modrou křivkou. Hodnoty PID regulátoru byly odladěny na základě měření.



Obr. 3.6.5 nastavení požadovaného tlaku

## 4. Měření vybraných prvků

Pro měření zvukové vodivosti a tlakových poměrů jsem vybral prvky, které byly k dispozici v laboratoři a odpovídaly požadovaným hodnotám jako je tlakový rozsah a maximální průtok.

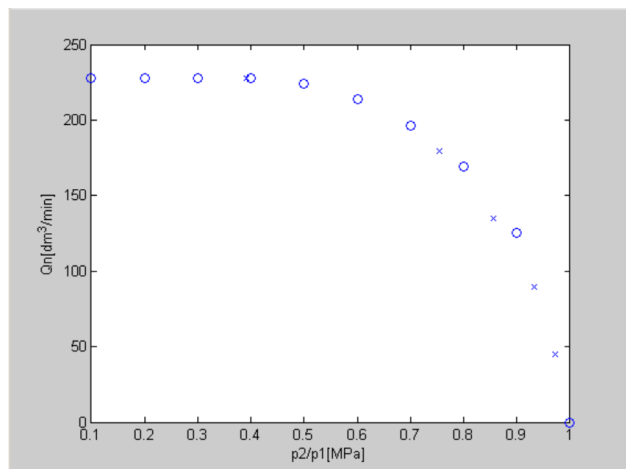
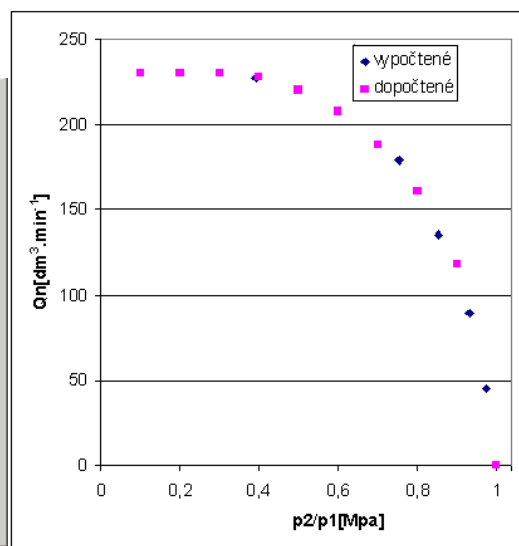
### 4.1 SYA 3220 SMC

Tento rozváděč 5/2 od firmy SMC je k dispozici v laboratoři katedry. Prvek je zapojen mezi dva tlakoměry, kde probíhá měření zvukové vodivosti  $C$  a kritického tlakového poměru  $b$ . Pro tento prvek je níže uveden příklad výpočtu pomocí rovnic (2,1; 2,2). Zjištěné hodnoty  $C$ ,  $b$  jsou následně použity pro výpočet objemového průtoku  $q$  z rovnic (2,3; 2,4). Veškeré rovnice pro výpočet byly naprogramovány do souboru *vodivost.m* M-file, který zároveň umožňuje vykreslení grafu  $p/Q$ . Graf zobrazuje jak naměřené hodnoty jednotlivých úseků (označeny křížkem), tak dopočtené hodnoty průtoku (označeny kolečkem).

Existuje však také druhý způsob vyhodnocení výsledků a to pomocí programu Excel, obr. 4.1.2. Tytéž hodnoty byly převedeny z programu Matlab do Excel. Ten pak vykreslil graf, na němž jsou znázorněna vypočtená data (modře) a data dopočtená (fialově).

V tab. 4.1.1 jsou zaznamenána data měření při 6 bar. Nutno však podotknout, že průměrná hodnota z  $b$  je tvořena pouze z prvních čtyř vypočtených hodnot a to proto, že při 20% průtoku dosahoval kritický tlakový poměr záporných hodnot. Pokud se tato hodnota vynechá, výsledný kritický poměr tlaku lépe odpovídá hodnotě uvedené v katalogu. Tabulka 4.1.2 popisuje tlakové poměry 0,1 až 1. Pro každou hodnotu tlakového poměru pro nadkritické a podkritické proudění je vypočten objemový průtok podle rovnice (2,3; 2,4).

U jednotlivých prvků bylo provedeno měření při 6bar a při 5 bar. Porovnání hodnot výrobce a jednotlivých výpočtů je zaznamenáno v tab.4.1.5.

**Tlak 6 [bar]****Matlab***obr.4.1.1 graf matlab***Excel***obr.4.1.2 graf excel**tab. 4.1.1 naměřené data*

	Q	p1	p2	p2/p1	b	C
2-3 s.	227,4037	0,690228	0,2708	0,392334	0,392334	0,549103
6-7 s.	179,2105	0,691032	0,521893	0,755237	0,363288	
10-11 s.	135,142	0,676637	0,578522	0,854996	0,259215	
14-15 s.	89,847	0,672461	0,626985	0,932374	0,168818	
18-19	45,03393	0,672349	0,655334	0,974693	-0,27779	

průměr  
(b)

0,295914

*tab. 4.1.2 dopočtené data*

p2/p1	q
0,1	230,6232
0,2	230,6232
0,3	230,6232
0,4	228,0893
0,5	220,7224
0,6	208,0054
0,7	188,8607
0,8	161,0114
0,9	118,4704
1	0

**příklad výpočtu:**

$$b = 1 - \frac{\frac{\Delta p}{p1}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Q}{Q_{\max}}\right)^2}} = 1 - \frac{\frac{0,690228 - 0,2708}{0,690228}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{227,4037}{227,4037}\right)^2}} = 0,392334$$

$$C = \frac{Q}{p1} = \frac{\frac{Q}{60}}{p1 \cdot 10} = \frac{\frac{227,4037}{60}}{0,690228 \cdot 10} = 0,549103 \quad [\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}]$$

Pro  $p_2/p_1=0,4$

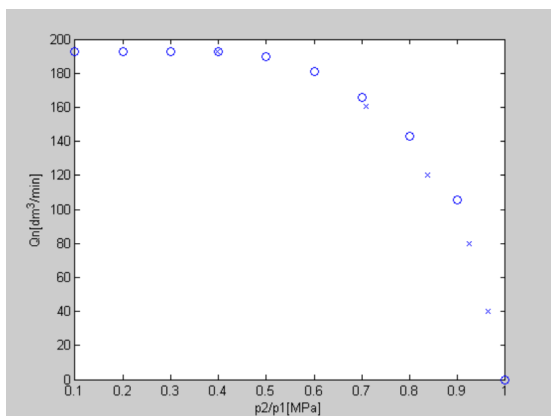
$$q = p_1 \cdot C \cdot \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{p_2}{p_1} - b\right)^2}{(1-b)^2}} = 7 \cdot 0,549103 \cdot \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{0,2708}{0,690228} - 0,295914\right)^2}{(1-0,295914)^2}} = 228,0893 [dm^3 \cdot min^{-1}]$$

Pro  $p_2/p_1=0,3$

$$q = p_1 \cdot C \cdot 60 = 7 \cdot 0,549103 \cdot 60 = 230,62 [dm^3 \cdot min^{-1}]$$

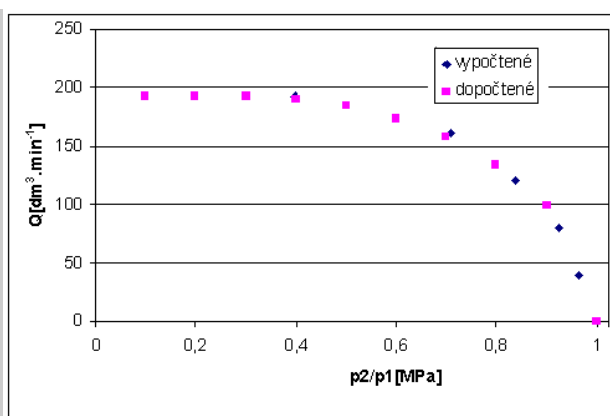
Pro 5 [bar]

Matlab



obr. 4.1.3 graf Matlab

Excel



obr.4.1.4 graf Excel

tab.4.1.3 naměřené data

	Q	p1	p2	p2/p1	b	C
2-3 s.	192,5684	0,599874	0,238452	0,397503	0,397503	0,535025
6-7 s.	160,6183	0,599584	0,425435	0,70955	0,3522	
10-11 s.	119,9605	0,600164	0,502994	0,838094	0,256421	
14-15 s.	80,0972	0,599978	0,554911	0,924886	0,171002	
18-19	39,85183	0,599814	0,578335	0,964191	-0,65415	

Průměr  
(b)

0,294281

tab. 4.1.4 dopočtené data

p2/p1	q
0,1	192,6088
0,2	192,6088
0,3	192,6088
0,4	190,4356
0,5	184,244
0,6	173,5979
0,7	157,5971
0,8	134,3416
0,9	98,83682
1	0

tab. 4.1.5 porovnání hodnot

6 bar

5 bar

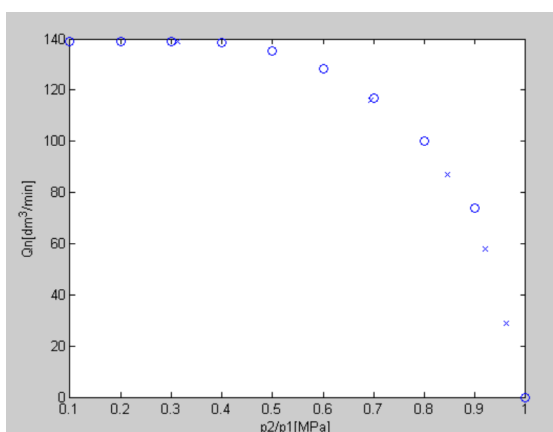
	C	b	C	b	Qn
Excel	0,549103	0,295904	0,535025	0,294281	
Matlab	0,5453	0,4256	0,5350	0,3924	137
výrobce	0,61	0,44			157

## 4.2 R3M5 Festo

Tento 3/2 rozváděč s kladkou je k dispozici v laboratoři. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v (tab. 4.2.1 až 4.2.2) pro 5 bar a v (tab. 4.2.3 až 4.2.4) pro 6 bar. Dále jsou zobrazeny grafy jak v programu Matlab tak programu Excel a ty jsou zaznamenány na obr. 4.2.1 a obr. 4.2.2. Porovnání s hodnotami výrobce lze vyčíst v tab.4.2.5.

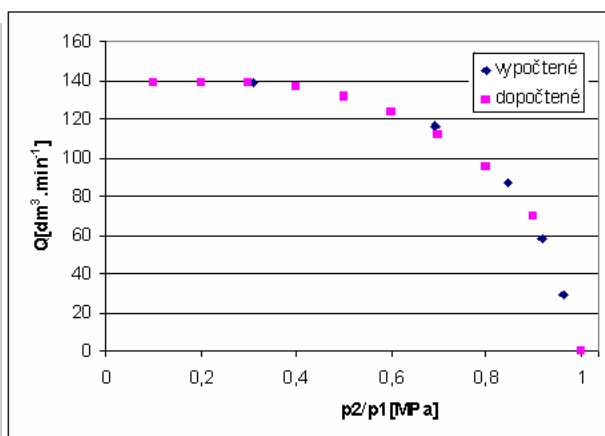
### Pro 5 [bar]

**Matlab**



obr. 4.2.1 graf Matlab

**Excel**



obr. 4.2.2 graf Excel

tab. 4.2.1 naměřené data

	Q	p1	p2	p2/p1	b	C
2-3 s.	139,1127	0,600023	0,187018	0,311685	0,311685	0,386409
6-7 s.	116,081	0,599956	0,41625	0,693801	0,317889	
10-11 s.	86,94659	0,600201	0,507832	0,846103	0,298498	
14-15 s.	58,02499	0,600246	0,551755	0,919215	0,113643	
18-19	28,997	0,599963	0,576951	0,961644	-0,74619	

průměr 0,260429

tab. 4.2.2 dopočtené data

p2/p1	q
0,1	139,1127
0,2	139,1127
0,3	139,1127
0,4	136,6078
0,5	131,6067
0,6	123,5775
0,7	111,8701
0,8	95,13593
0,9	69,85133
1	0

### Pro 6 [bar]

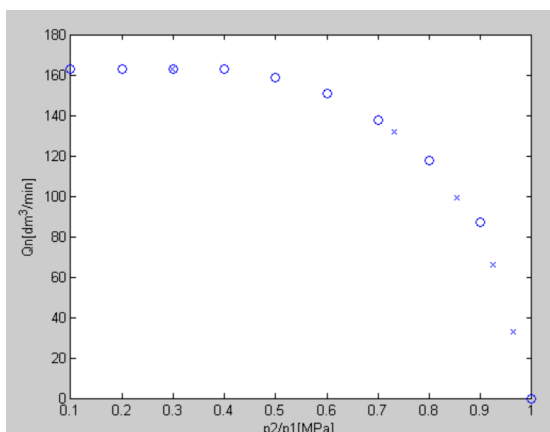
tab. 4.2.3 naměřené data

	Q	p1	p2	p2/p1	b	C
2-3 s.	163,0997	0,699376	0,208701	0,29841	0,29841	0,388679
6-7 s.	131,9399	0,700567	0,54128	0,772631	0,448302	
10-11 s.	99,104	0,700128	0,59803	0,854172	0,291337	
14-15 s.	66,05105	0,699934	0,646888	0,924213	0,115376	
18-19	32,98289	0,700106	0,675113	0,964301	-0,72784	

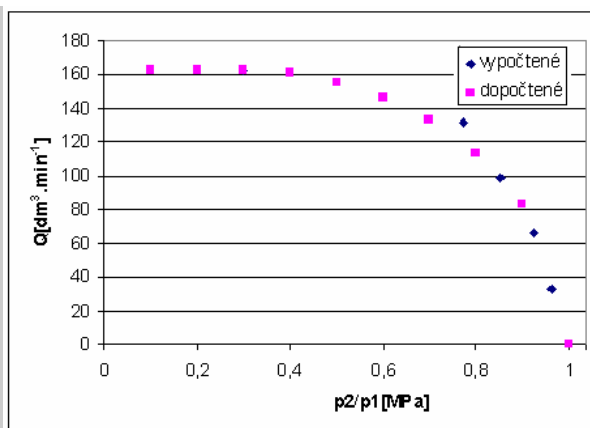
průměr 0,288356

tab. 4.2.4 dopočtené data

p2/p1	q
0,1	163,0997
0,2	163,0997
0,3	163,0997
0,4	161,2238
0,5	155,8588
0,6	146,7596
0,7	133,1631
0,8	113,4637
0,9	83,44588
1	0

**Matlab**

obr.4.2.3 graf Matlab

**Excel**

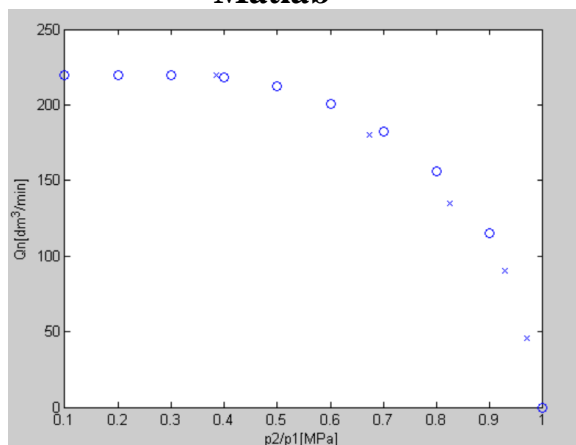
obr. 4.2.4 graf excel

tab. 4.2.5 porovnání hodnot

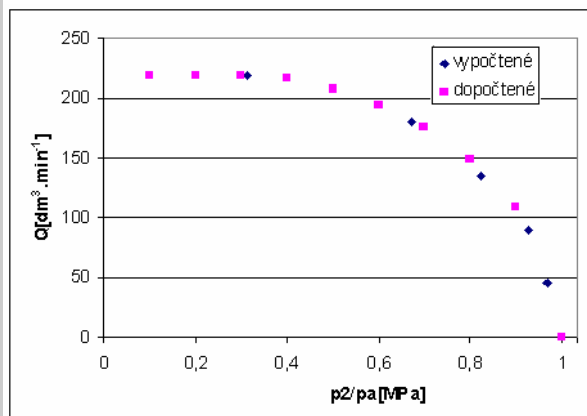
	6 bar		5 bar		
	C	b	C	b	Qn
Excel	0,388679	0,288356	0,386409	0,2604	
Matlab	0,3887	0,3516	0,3864	0,3472	101
výrobce					80

**4.3 EVM13 SMC**

Tento rozváděč 2/3 s kladkou od firmy SMC je k dispozici v laboratoři katedry. Pro měření při 6 bar jsou naměřené hodnoty zaznamenány v tab. 4.3.1 a tab. 4.3.2. Dále jsou vykresleny grafy závislosti jak v programu Matlab, tak Excel, obr. 4.3.1 a obr. 4.3.2. Pro porovnání naměřených a vypočtených hodnot je vytvořena tab. 4.3.5, ze které lze vyčíst hodnoty výrobce. Pro měření při 5 bar je postup stejný jako u 6 bar. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.3.3 a tab. 4.3.4., graf zpracován na obr. 4.3.3 a obr. 4.3.4, hodnoty pro porovnání zaznamenány v tab. 4.3.5 společně s tlakem 6 bar.

**Pro 6 [bar]****Matlab**

obr.4.3.1 graf Matlab

**Excel**

obr. 4.3.2 graf Excel

tab. 4.3.1 naměřené hodnoty

	Q	p1	p2	p2/p1	b	C
2-3 s.	219,7793	0,691404	0,216615	0,313297	0,313297	0,52979
6-7 s.	180,309	0,694062	0,467735	0,67391	0,238504	
10-11 s.	134,8945	0,698059	0,5755	0,824429	0,166001	
14-15 s.	90,07061	0,701177	0,650692	0,928	0,180276	
18-19	45,60055	0,702912	0,681902	0,97011	-0,37353	
průměr					0,224519	

tab. 4.3.2 vypočtené hodnoty

p2/p1	q
0,1	219,7793
0,2	219,7793
0,3	219,7793
0,4	216,74
0,5	207,9986
0,6	194,6894
0,7	175,778
0,8	149,1484
0,9	109,2974
1	0

**Pro 5 [bar]**

tab. 4.3.3 naměřené hodnoty

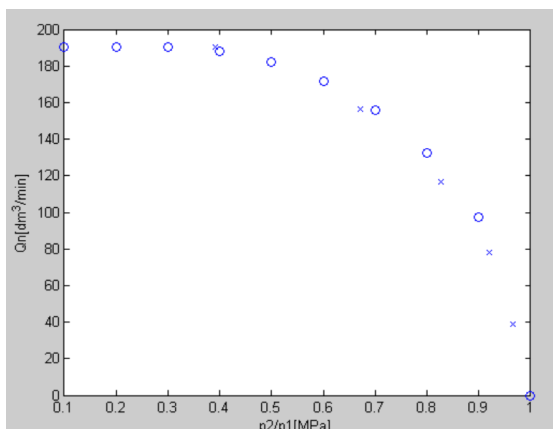
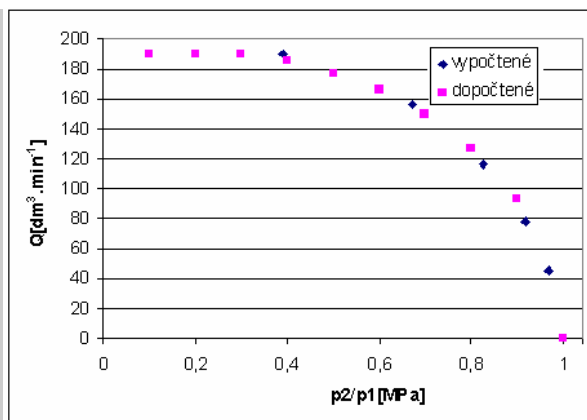
	Q	p1	p2	p2/p1	b	C
2-3 s.	190,4322	0,600112	0,234923	0,391465	0,391465	0,52888
6-7 s.	156,5412	0,5998	0,40309	0,672041	0,238291	
10-11 s.	116,7474	0,600045	0,495536	0,825831	0,170499	
14-15 s.	77,99787	0,599829	0,551339	0,91916	0,078512	
18-19	45,60055	0,702912	0,681902	0,97011	-0,02738	
průměr					0,219692	

tab. 4.3.4 vypočtené hodnoty

p2/p1	Q
0,1	190,4322
0,2	190,4322
0,3	190,4322
0,4	185,2438
0,5	177,6877
0,6	166,2522
0,7	150,0532
0,8	127,2846
0,9	93,25266
1	0

tab. 4.3.5 porovnání hodnot

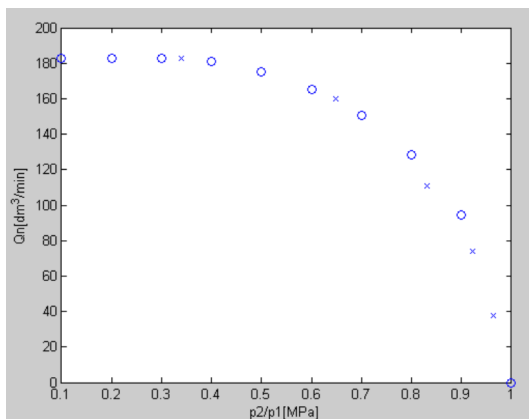
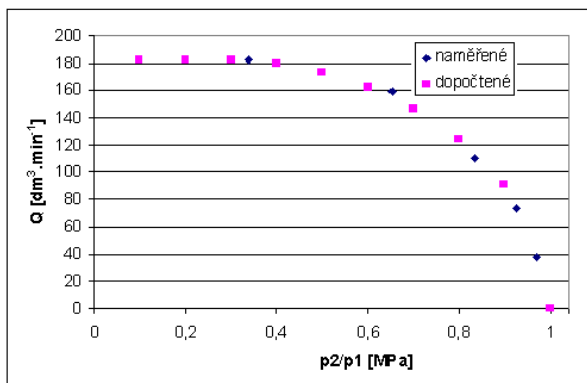
	6 bar		5 bar		Q <sub>n</sub>
	C	b	C	b	
Excel	0,52979	0,224519	0,5288	0,219692	
Matlab	0,5298	0,3232	0,5289	0,2929	131
výrobce	0,5	0,4			138

**Matlab***obr. 4.3.3 graf Matlab***Excel***obr. 4.3.4 graf Excel*

#### 4.4 SV-5-M5 B SMC

Poslední prvek, který byl zvolen je rozváděč 2/5 s tlačítkem od firmy SMC je ovládaný do výchozí polohy pružinou. Pro měření při 6 bar jsou naměřené hodnoty zaznamenány v tab. 4.4.1 a dopočtené hodnoty v tab. 4.4.2. Dále jsou vykresleny grafy závislosti jak v programu Matlab, tak Excel, obr. 4.4.1 a obr. 4.4.2. Pro porovnání naměřených a vypočtených hodnot je vytvořena tab. 4.4.5, ze které lze vyčíst hodnoty výrobce. Pro měření při 5 bar je postup stejný jako u 6 bar. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.4.3 a dopočtené hodnoty v tab. 4.4.4. graf zpracován na obr. 4.4.3 a obr. 4.4.4, hodnoty pro porovnání zaznamenány v tab. 4.4.5 společně s tlakem 6 bar.

##### Pro 6 [bar]

**Matlab***obr. 4.4.1 graf Matlab***Excel***obr. 4.4.2 graf Excel*



tab. 4.4.1 naměřené hodnoty

	Q	p1	p2	p2/p1	b	C
2-3 s.	182,5494	0,6981	0,2363	0,33849	0,33849	0,435824
6-7 s.	159,802	0,6956	0,4548	0,653824	0,329874	
10-11 s.	110,7968	0,6956	0,5813	0,835681	0,199436	
14-15 s.	73,95336	0,6956	0,6452	0,927545	0,15488	
18-19	37,4985	0,695625	0,67524	0,970695	-0,37418	
				průměr (b)	0,25567	

tab. 4.4.2 vypočtené hodnoty

p2/p1	Q
0,1	182,5494
0,2	182,5494
0,3	182,5494
0,4	179,572
0,5	172,9035
0,6	162,2824
0,7	146,8537
0,8	124,8474
0,9	91,64173
1	0

**Pro 5 [bar]**

tab. 4.4.3 naměřené hodnoty

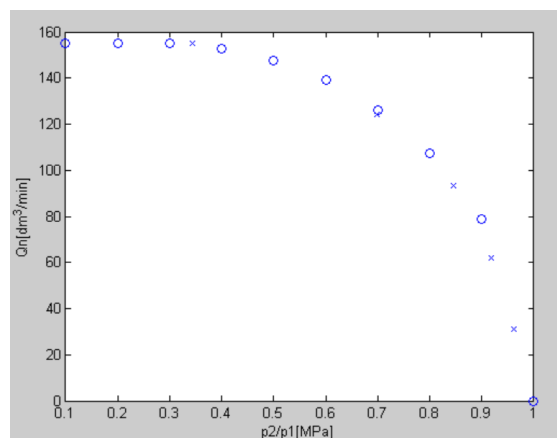
	Q	p1	p2	p2/p1	b	C
2-3 s.	154,91	0,6	0,206	0,343333	0,343333	0,430306
6-7 s.	124,12	0,6	0,418	0,696667	0,244793	
10-11 s.	93,18378	0,6	0,5	0,833333	0,171445	
14-15 s.	61,902	0,6	0,5514	0,919	0,027731	
18-19	30,89	0,6	0,5769	0,9615	-0,91704	
				průměr (b)	0,196826	

tab. 4.4.4 vypočtené hodnoty

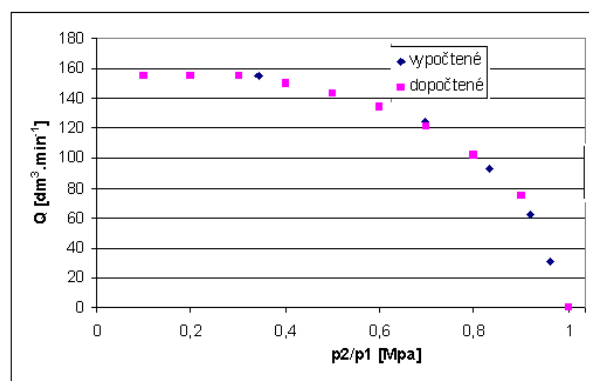
p2/p1	Q
0,1	154,91
0,2	154,91
0,3	154,91
0,4	149,8717
0,5	143,45
0,6	133,9788
0,7	120,7424
0,8	102,2895
0,9	74,857
1	0

tab. 4.4.5 porovnání hodnot

	6 bar		5 bar		Qn
	C	b	C	b	
Excel	0,435824	0,25567	0,430306	0,196826	
Matlab	0,4356	0,2831	0,4356	0,3066	103
výrobce					95

**Matlab**

obr. 4.4.3 graf Matlab

**Excel**

obr. 4.4.4 graf Excel

## 5 Vyhodnocení naměřených dat

Naměřené data byly v tabulkách porovnány s hodnotami od výrobce a lze v těchto případech říci, že hodnota zvukové vodivosti  $C$  se shodovala s daty od výrobce. Na rozdíl od kritického poměru tlaku  $b$ , kde se tyto hodnoty mírně lišily a to z důvodu výpočtu, kde se muselo počítat s průměrnou hodnotou z prvních čtyř úseku měření (jak jsem již popsal výše), lze ale říci, že měření bylo přesnější při 0,6 MPa. Hodnota normálního průtoku se u všech proměřených prvků pohybuje kolem hodnot od výrobce. Jen některé prvky měly hodnoty jak vyšší, tak nižší. Tyto chyby mohly být ovlivněny šroubením nebo také tím, že katalogové hodnoty jsou zjišťovány z větších počtu kusů proměřených prvků, z kterých je vytvořena průměrná hodnota, která je následně zaznamenána v katalogu. Hodnoty k porovnání jsou zaznamenány v celkovém přehledu v tab 5.1.1.

Tab. 5.1.1 celkový přehled

### SYA 3220 SMC

	<b>6 bar</b>		<b>5 bar</b>		
	<b>C</b>	<b>b</b>	<b>C</b>	<b>b</b>	<b>Qn</b>
Excel	0,549103	0,295904	0,535025	0,294281	
Matlab	0,5453	0,4256	0,5350	0,3924	137
výrobce	0,61	0,44			157

### R3M5 Festo

	<b>6 bar</b>		<b>5 bar</b>		
	<b>C</b>	<b>b</b>	<b>C</b>	<b>b</b>	<b>Qn</b>
Excel	0,388679	0,288356	0,386409	0,2604	
Matlab	0,3887	0,3516	0,3864	0,3472	101
výrobce					80

### EVM13 SMC

	<b>6 bar</b>		<b>5 bar</b>		
	<b>C</b>	<b>b</b>	<b>C</b>	<b>b</b>	<b>Qn</b>
Excel	0,52979	0,224519	0,5288	0,219692	
Matlab	0,5298	0,3232	0,5289	0,2929	131
výrobce	0,5	0,4			138

### SV-5-M5 B SMC

	<b>6 bar</b>		<b>5 bar</b>		
	<b>C</b>	<b>b</b>	<b>C</b>	<b>b</b>	<b>Qn</b>
Excel	0,435824	0,25567	0,430306	0,196826	
Matlab	0,4356	0,2831	0,4356	0,3066	103
výrobce					95

## 6 Závěr

Má diplomová práce na téma *Měření průtokových charakteristik pneumatických prvků pomocí programu Matlab-Simulink* byla rozdělena do několika částí.

Nejdříve jsem sestavil přehled průtokových součinitelů řídicích prvků a vedení stlačeného vzduchu, kde jsem se zaměřil na jednotlivé přepočty průtokových součinitelů a výpočty průtoku, jak v paralelním, tak sériovém řazení.

Další krok popisoval způsob měření průtokových součinitelů dle normy ISO, kde bylo mým cílem objasnit problematiku pro výpočet zvukové vodivosti  $C$ , kritického poměru tlaku  $b$  a objemového případně hmotnostního průtoku pro dané nadkritické a podkritické proudění vzduchu. V tomto bodě jsem se zabýval také srovnáním mezi evropskou ISO normou a japonskou verzí JIP.

V následujícím bodě se diplomová práce zaměřila na způsob měření průtokových součinitelů dle normy ISO 6358, kde byla měřicí trať popsána do detailu a to především její využitelnost, umístění daných měřicích a řídicích prvků, nastavení požadovaných hodnot. Pro měření jsem využil snímače a řídicí prvky, jenž byly k dispozici v laboratoři katedry. Tyto prvky musely odpovídat danému rozsahu. Jejich vstupní a výstupní signály musely vyhovovat požadovaným kritériím, která nařizuje norma ISO 6358. Zapojení probíhalo pomocí elektrických vodičů, ty se pak napojily do svorkovnice, která byla následně propojena s PC. Měřicí karta MF 624 je zapojena v PC na daný slot. Tato karta umožňuje odesílání naměřených dat do prostředí Matlab. Po zapojení trati bylo zapotřebí sestavit v programu Matlab-Simulink program pro měření a řízení tlaku a průtoku. V posledním bodě došlo k samotnému měření pneumatických prvků. Pro měření jsem si vybral prvky od firmy SMC a FESTO. Pro kontrolu měření jsem si obstaral katalogové hodnoty požadovaných vypočtených veličin. Jednalo se o zvukovou vodivost  $C$ , kritický tlakový poměr  $b$  a normální jmenovitý průtok.

Hlavním cílem práce bylo sestavit program pro měření průtokových charakteristik pneumatických prvků pomocí programu Matlab-Simulink a zautomatizovat a zjednodušit tím měření. Uvedený cíl byl splněn, i když s některými omezeními, jako jsou např. možnost měření pouze do průtoku  $350 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , a doba měření 20 s. Průtok je omezen světlostí proporcionálního rozváděče, při použití většího rozváděče by bylo možno měřit průtokové charakteristiky prvků s větší světlostí. Obě omezení souvisejí se zdrojem stlačeného vzduchu. Tato omezení by mohla být napravena použitím výkonnějšího kompresoru a většího vzdušníku.

## 7 Seznam příloh

### Příloha A

**M- file** => *vodivost.m*

```
i=102:142;
pa= 0.1
p11a=mean(p1(i));
p11=p11a+pa;
p21a=mean(p2(i));
p21=p21a+pa;
pp1=p21/p11
Q1=mean(Qn(i))
plot(pp1,Q1,'x')
Hold on;
j=273:313;
p12a=mean(p1(j));
p12=p12a+pa;
p22a=mean(p2(j));
p22=p22a+pa;
pp2=p22/p12
Q2=mean(Qn(j))
plot(pp2,Q2,'x')
hold on
k=440:480;
p13a=mean(p1(k));
p13=p13a+pa;
p23a=mean(p2(k));
p23=p23a+pa;
pp3=p23/p13
Q3=mean(Qn(k))
plot(pp3,Q3,'x')
hold on
l=607:647;
p14a=mean(p1(l));
p14=p14a+pa;
p24a=mean(p2(l));
p24=p24a+pa;
pp4=p24/p14
Q4=mean(Qn(l))
plot(pp4,Q4,'x')
Hold on
hold on
```

```
m=774:814;
p15a=mean(p1(m));
p15=p15a+pa;
p25a=mean(p2(m));
p25=p25a+pa;
pp5=p25/p15
Q5=mean(Qn(m));
plot(pp5,Q5,'x')
Hold on
xlabel('p2/p1[MPa]')
ylabel('Qn[dm^3/min]')
hold on
p2p1
=[0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8
,0.9,1.0]
Qmax=Q1;
C=(Q1/60)/(p11*10)
b1=1-((p11-p21)/p11)/(1-(1-
(Q1/Qmax)^2)^0.5);
b2=1-((p12-p22)/p12)/(1-(1-
(Q2/Qmax)^2)^0.5);
b3=1-((p13-p23)/p13)/(1-(1-
(Q3/Qmax)^2)^0.5);
b4=1-((p14-p24)/p14)/(1-(1-
(Q4/Qmax)^2)^0.5);
b5=1-((p15-p25)/p15)/(1-(1-
(Q5/Qmax)^2)^0.5);
b=(b1+b2+b3+b4)/3
for ii=1:10
z(ii)=C*60*p11*10;
if p2p1(ii)>b z(ii)=C*p11*10*(1-
(p2p1(ii)-b)/(1-b)*(p2p1(ii)-
b)/(1-b))^0.5*60; end
end
Q1a=z
hold on
plot(p2p1,Q1a,'o')
```

## 8 Seznam použité literatury

- [1] Kopáček, J. *Pneumatické mechanismy Díl I. Pneumatické prvky a systémy*. Skriptum VŠB- TU Ostrava 1996.
- [2] Kolektiv autorů. *SMC Training – Stlačený vzduch a jeho využití*. Brno, SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.
- [3] BEATER, P. *Pneumatic drives : system design, modeling and control*. Berlin: Springer. 2007. 323 s. ISBN 978-3-540-69470-0
- [4] NEVRLÝ, J.: *Modelování pneumatických systémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno , 2003. 180 s. 1. vydání. ISBN 80-7204-300-5
- [5] KAWASHIMA, Kenji . *Solenoid valve* [online]. MARCH 2004. Yokohama : Tokyo Institute of Technology, 2004 [cit. 2010-03-23]. *Journal of Fluids Engineering*. Dostupné z WWW: <[http://www.k-k.pi.titech.ac.jp/pdf/Solenoid\\_valve.pdf](http://www.k-k.pi.titech.ac.jp/pdf/Solenoid_valve.pdf)>.
- [6] *Design machine* [online]. 2010-10-5 [cit. 2010-03-19]. Clearing the air on pneumatic valve ratings. Dostupné z WWW: <<http://machinedesign.com/article/clearing-the-air-on-pneumatic-valve-ratings-1005>>.
- [7] D.SCHMID A KOL.: *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. Praha: Europa-Sobotáles, 2005, 420S. ISBN 80-86706-10-9] pid
- [8] *SMC : Competence in Automation* [online]. 2010-01-14 [cit. 2010-05-16]. Měřené prvky. Dostupné z WWW: <<http://www.smc.cz>>.
- [9] *Valve R3M5* [online]. 2010-04-14 [cit. 2010-05-21]. KFF Automacao. Dostupné z WWW:<[http://www.kffautomacao.com/product\\_info.php?manufacturers\\_id=33&products\\_id=4302](http://www.kffautomacao.com/product_info.php?manufacturers_id=33&products_id=4302)>.
- [10] *Pneumatyka pl : Norma ISO 6358*. 2006, 2006, 6/61, s. 15-17.
- [11] *Mezinárodní standard ISO 6358. Pneumatika : přechodové charakteristiky*. 1989, 1, s. 1-14.